

SÉRIE A N° 763.

N° D'ORDRE :

1539

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

M. Paul FOURNEL

Professeur de l'Enseignement Technique

1^{re} THÈSE. — RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR LA CONSTITUTION
DES ACIERS.

2^{me} THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le *5 juin* 1914 devant la Commission d'examen

MM. LIPPMANN, *Président.*

H. LE CHATELIER

SAGNAC

} *Examineurs.*

MARSEILLE

TYPOGRAPHIE ET LITHOGRAPHIE BARLATIER

17-19, Rue Venture, 17-19

1914



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41554605_0051

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES
SUR
LA CONSTITUTION DES ACIERS

SÉRIE A N° 763.

N° D'ORDRE :

1539

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

M. Paul FOURNEL

Professeur de l'Enseignement Technique

1^{re} THÈSE. — RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR LA CONSTITUTION
DES ACIERS.

2^{me} THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.



Soutenues le **1914** devant la Commission d'examen

MM. LIPPMANN, *Président.*

H. LE CHATELIER

SAGNAC

} *Examineurs.*

MARSEILLE

TYPOGRAPHIE ET LITHOGRAPHIE BARLATIER

17-19, Rue Venture, 17-19

1914

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

<i>Doyen</i>	P. APPELL, Professeur ..	Mécanique analytique et Mécanique céleste.
<i>Doyen honoraire</i>	G. DARBOUX, —	Géométrie supérieure.
<i>Professeurs honoraires</i> {	Ch. WOLF.	
	J. RIBAN.	
<i>Professeurs</i>	LIPPMANN	Physique.
	BOUTY.....	Physique.
	BOUSSINESQ	Physique mathém. et calcul des probabilités.
	PICARD.....	Analyse supérieure et algèbre supérieure.
	Y. DELAGE	Zoologie, anatomie, physiologie comparée.
	Gaston BONNIER ...	Botanique.
	DASTRE.....	Physiologie.
	KËNIGS.....	Mécanique physique et expérimentale.
	VÉLAIN.....	Géographie physique.
	GOURSAT	Calcul différentiel et calcul intégral.
	HALLER.....	Chimie organique.
	JOANNIS	Chimie (Enseignement P. C. N.).
	JANET	Physique. —
	WALLERANT.....	Minéralogie.
	ANDOYER.....	Astronomie.
	PAINLEVÉ.....	Mécanique rationnelle.
	HAUG.....	Géologie.
	HOUSSAY	Zoologie.
	H. LE CHATELIER...	Chimie.
	Gabriel BERTRAND .	Chimie biologique.
	M ^{me} P. CURIE	Physique générale.
	CAULLERY	Zoologie (Évolution des êtres organisés).
	C. CHABRIÉ.....	Chimie appliquée.
	G. URBAIN	Chimie.
	Émile BOREL	Théorie des fonctions.
	MARCHIS.....	Aviation.
	Jean PERRIN.. ..	Chimie physique.
	G. PRUVOT.....	Zoologie, anatomie, physiologie comparée.
	MATRUCHOT.....	Botanique.
	ABRAHAM.....	Physique.
	CARTAN.....	Calcul différentiel et calcul intégral.
	Cl. GUICHARD.....	Mathématiques générales.
	MOLLIARD	Physiologie végétale.
	N	Application de l'analyse à la géométrie.
	N	Histologie.
<i>Professeurs-adjoints</i> ...	PUISEUX.....	Mécanique et astronomie.
	LEDUC.....	Physique.
	MICHEL.....	Minéralogie.
	HÉROUARD.....	Zoologie.
	Léon BERTRAND ...	Géologie.
	Rémy PERRIER	Zoologie (Enseignement P. C. N.).
	COTTON.....	Physique.
	LESPIAU.....	Chimie.
	GENTIL.....	Pétrographie.
	SAGNAC.....	Physique (Enseignement P. C. N.).
	PEREZ	Zoologie (Évolution des êtres organisés).
<i>Secrétaire</i>	D. TOMBECK.	

A MM. HENRY LE CHATELIER

MEMBRE DE L'INSTITUT

et ANDRÉ LE CHATELIER

ANCIEN INGÉNIEUR DE LA MARINE

HOMMAGE DE RESPECTUEUSE GRATITUDE

A MONSIEUR FABRY

PROFESSEUR A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE MARSEILLE

SON ÉLÈVE RECONNAISSANT

PREMIÈRE THÈSE

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES

SUR

LA CONSTITUTION DES ACIERS

(Résistance Electrique.— Courbes de traction)

INTRODUCTION

Allotropie du fer. — L'existence des formes allotropiques du fer a été établie pour la première fois par M. Osmond (1) dans des expériences restées classiques. Ce savant a montré qu'un échantillon de fer aussi pur que possible (2), porté à la température de 1100° ne se refroidit pas régulièrement.

A la température de 855° , se produit un dégagement brusque de chaleur qui a pour effet de ralentir le refroidissement. Ce point critique est indiqué par la notation Ar_3 (La lettre r indique que le phénomène a été observé au refroidissement.)

Vers 750° — 730° , un nouveau dégagement de chaleur produit un second ralentissement qui se continue sur un certain intervalle de température : c'est la transformation Ar_2 .

Les phénomènes inverses se produisent à l'échauffement (Points Ac_3 et

(1). Annales des mines. S. 8. N° 14. 1888, p. 5.

(2). Fer électrolytique contenant 0,08 o/o de carbone.

Ac₂) et à des températures d'autant plus voisines des précédentes que les vitesses de refroidissement et d'échauffement sont plus faibles.

Les résultats trouvés par M. Osmond ont été confirmés par les expériences de Roberts-Austen (1) et de MM. Carpenter et Kelling (2).

Roberts-Austen utilise une méthode différentielle, afin d'éliminer les perturbations qui peuvent provenir de l'enceinte elle-même. L'auteur a constaté dans le refroidissement d'un fer électrolytique les anomalies suivantes :

A 1132°, un point qui avait été signalé antérieurement par Ball ;

A 895°, le point Ar₃ trouvé par M. Osmond ;

A 775°, — Ar₂ —

De plus, Roberts-Austen a constaté trois autres dégagements de chaleur : le premier entre 550° et 600° ; le second entre 450° et 500° ; le troisième vers 260°.

D'après l'auteur lui-même, ces dernières perturbations n'indiqueraient pas des transformations du fer. Elles seraient dues à la présence de l'hydrogène occlus dans le fer électrolytique.

MM. Carpenter et Kelling ont établi les courbes de refroidissement d'une série d'alliages fer-carbone dont la teneur en cet élément croît régulièrement. L'échantillon qui se rapproche le plus du fer pur (Carbone = 0,01 %) présente les deux points Ar₃ et Ar₂ aux températures suivantes :

Ar₃..... 901° — 900°

Ar₂..... 784° — 762°

Ces expérimentateurs ont, comme le précédent, constaté un dégagement de chaleur vers 600°. Ils l'ont désigné par la notation Ar₀. Il est intéressant de remarquer ce point Ar₀, sur la nature duquel l'accord n'est pas encore fait, se retrouve dans tous les échantillons étudiés par MM. Carpenter et Kelling.

Ces trois séries de recherches sont parfaitement concordantes en ce qui concerne l'existence des transformations A₃ et A₂. — Les températures indiquées par Roberts-Austen et MM. Carpenter et Kelling présentent un accord très satisfaisant, mais elles diffèrent de celles qui ont été données par M. Osmond. Cette différence provient, croyons-nous, des rectifications qui ont été apportées à l'échelle thermométrique normale dans l'intervalle qui s'est écoulé entre ces recherches (3).

(1) The Institution of mechanical Engineers, 1899. p. 35.

(2) Journal of the Iron and Steel Institute. 1904. N° 1. p. 224

(3) La présence de 0,08 o/o de carbone peut également expliquer un abaissement des points de transformation.

Quoi qu'il en soit, les expériences de refroidissement indiquent l'existence de trois formes allotropiques du fer. M. Osmond leur a donné les noms suivants : fer γ , β , α . Les zones de stabilité de ces différentes formes sont :

Au-dessus de 900°.....	fer γ
Entre 900° et 770°.....	fer β
Au-dessous de 770°.....	fer α

Influence du Carbone. — La présence, à côté du fer, d'éléments étrangers comme le carbone, le manganèse, le silicium, modifie notablement la position des points de transformation, tels qu'ils sont définis par la méthode de refroidissement.

En ce qui concerne l'influence du carbone, MM. Osmond, Roberts-Austen, Carpenter et Kelling ont observé les faits suivants :

1° Quand la teneur en carbone augmente, la position du point A_3 s'abaisse dans l'échelle des températures et se rapproche de celle du point A_2 . Pour une teneur en carbone de 0,35 o/o, les deux points sont confondus en un seul que l'on désigne par la notation $A_{3,2}$.

2° Un troisième dégagement de chaleur apparaît vers 690° (1). Son importance croît avec la teneur en carbone. C'est le point A_4 .

3° Pour une teneur d'environ 0,85 o/o de carbone, les trois points critiques se trouvent réunis en un seul qui correspond à un dégagement de chaleur relativement considérable : c'est le point $A_{3,2,4}$. Ce dégagement de chaleur avait été observé en 1873 par W. F. Barrett et signalé sous le nom de *récalescence*.

Caractère de chaque transformation. — Au cours de leurs recherches, MM. Carpenter et Kelling ont été frappés des différences présentées par chacune des transformations A_3 , A_2 , et A_4 .

Ils remarquèrent que A_3 , pour de faibles teneurs en carbone, et A_4 ($C > 0,30$ o/o) se manifestent d'une façon plutôt brusque. Au contraire, la transformation A_2 s'étale toujours sur un certain intervalle de température ; il en est de même de la transformation A_3 , quand la teneur en carbone dépasse 0,1 o/o.

Les auteurs proposent alors de substituer à l'expression : *points critiques* (criticals points), le terme : *zones critiques* (criticals ranges).

(1) M. Osmond constate déjà ce dégagement de chaleur dans l'échantillon électrolytique à 0,08 o/o de carbone. Dans les expériences de MM. Carpenter et Kelling, il apparaît dans l'échantillon à 0,12 o/o.

Diagramme de Roozeboom. — Les résultats fournis par la méthode de refroidissement ont permis au Professeur Roozeboom d'établir le diagramme d'équilibre des systèmes fer-carbone.

Nous rappelons brièvement, pour l'intelligence de ce qui va suivre, la partie de ce diagramme (Fig. 1) relative aux aciers.

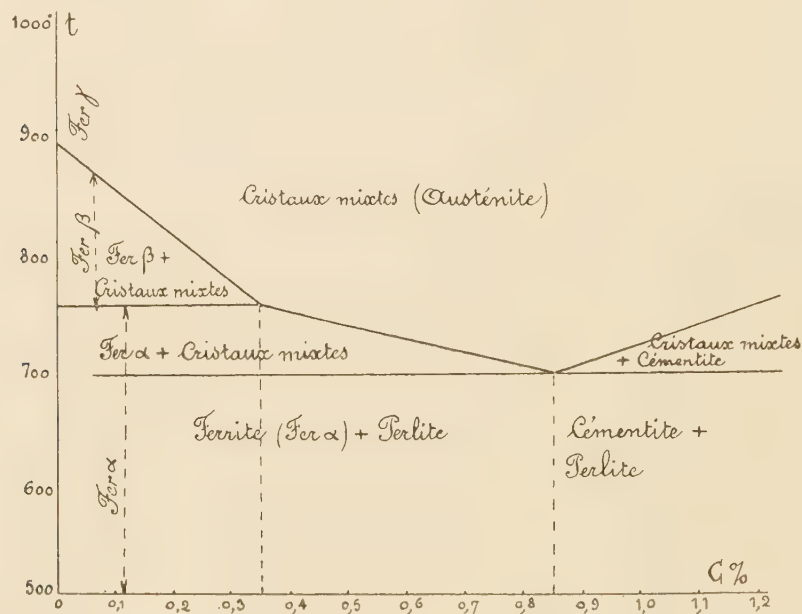
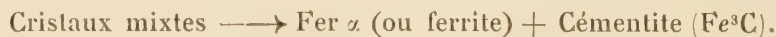


FIGURE 1.

La région supérieure du plan est la zone de stabilité du fer γ . Dans cette région, le carbone est dissous dans le fer γ et donne des *cristaux mixtes* qui, par refroidissement brusque, forment le constituant connu sous le nom de *martensite*.

Par refroidissement lent, la solution dépose, suivant la teneur en carbone, soit successivement du fer β et du fer α ($C < 0,35$ o/o), soit directement du fer α ($0,35$ o/o $< C < 0,85$ o/o), soit enfin le composé défini Fe^3C connu sous le nom *cémentite* ($C > 0,85$ o/o),

En même temps, la concentration en carbone des *cristaux mixtes* augmente ; elle atteint 0,85 o/o à la température de 690°. — A cette température, les *cristaux mixtes* à 0,85 o/o de carbone se transforment de la façon suivante :



Le mélange ainsi obtenu est formé de lamelles alternantes de ferrite et de cémentite : c'est le constituant appelé *perlite*.

La formation de la perlite, ainsi d'ailleurs que sa structure, est de tous points analogue à celle des mélanges connus en physico-chimie sous le nom d'*eutectique*. Pour rappeler ces analogies, la perlite a reçu le nom d'*eutectoïde* (H. Howe).

L'acier *eutectoïde* contient 0,85 o/o de carbone. Les aciers *hypoeutectoïdes* contiennent moins de 0,85 o/o de carbone : ils sont constitués de perlite et d'un excès de ferrite.

Les aciers *hypereutectoïdes* contiennent plus de 0,85 o/o de carbone : ils sont constitués de perlite et d'un excès de cémentite.

Critique de la méthode de refroidissement. — Par sa nature même, la méthode de refroidissement ne permet pas de faire des observations à température stationnaire, et par suite de saisir le métal dans son état de stabilité définitif.

A d'autres points de vue d'ailleurs, elle a été l'objet de critiques dont les plus importantes ont été formulées par M. Charpy (1).

« La méthode thermique, dit cet auteur, est en somme une méthode « calorimétrique approximative. »

Or, les mesures calorimétriques exigent des conditions expérimentales parfaitement définies, difficiles à réaliser, lesquelles n'ont été que « très imparfaitement » remplies dans les dispositifs employés. Les erreurs qui peuvent en résulter n'ont pas une très grande importance, quand il s'agit de transformations rapides accompagnées d'un fort dégagement de chaleur (A_3 et A_4) ; mais pour les transformations qui s'étalent sur un certain intervalle de température (A_2) « les résultats fournis par la méthode thermique « présentent beaucoup plus d'incertitude. »

M. Charpy critique également le mode de représentation différentiel employé par M. Osmond et matérialisé par Roberts-Austen. Il trouve à cette méthode deux défauts principaux :

1° Elle fait ressortir le point culminant de la transformation et, par là même, elle tend à faire considérer comme brusque un phénomène qui s'étend sur un certain intervalle de température.

2° Elle ne permet pas d'affirmer que chaque pointe de la courbe correspond à une transformation. Il se peut en effet que « deux perturbations thermiques successives s'étendant chacune sur un certain intervalle de « température donnent plus de deux points culminants.

(1) Sur les alliages de fer et de carbone.

Bulletin de la Société chimique. 4^e série — 3. — 1908.

Recherches physiques. — Quelles que soient les critiques auxquelles peut donner lieu la méthode de refroidissement, celle-ci n'en constitue pas moins un procédé d'investigation fondamental dans l'étude des alliages.

En ce qui concerne le fer et les aciers au carbone, elle a été l'origine d'un grand nombre de recherches d'ordre physique dont l'ensemble constitue le chapitre le plus important de la sidérologie scientifique.

Le principe général de ces recherches est le suivant : Soit A une grandeur physique relative à un acier donné (1). Si l'on fait varier la température T de l'échantillon, tous les autres paramètres restant constants, l'étude de la fonction $f(A, T) = 0$ pourra servir :

1° A déterminer les zones de passage d'une forme allotropique à une autre ;

2° A caractériser chacune de ces formes dans la région où elle est normalement stable.

Dans le tableau suivant sont indiqués les principaux mémoires parus :

Nature de la grandeur A	Expérimentateurs
Chaleur spécifique.	{ <i>Pionchon</i> . C.R. Ac. Sc., t. 102 (1886)
	{ <i>H. Le Chatelier</i> . C.R. Ac. Sc., t. 107 (1888) ; t. 108 (1889) ; t. 129 (1899).
Volume.	{ <i>Svedelius</i> . Phil. mag. Série 5, t. 46 (1898). <i>G. Charpy</i> et <i>L. Grenet</i> . Bulletin Soc. Enc., t. 104 (1903). CR. Ac. Sc., t. 134 (1903).
Intensité d'aimantation. .	{ <i>Hopkinson</i> . Phil., Trans, t. 180 (1889). <i>Curie</i> . Thèse de doctorat (1895). <i>Morris</i> . Phil. Mag. Série 5, t. 44 (1897).
Thermo-électricité ,	{ <i>Harrison</i> . Phil. mag. série 6, t. 3 (1902). <i>Belloc</i> . — Thèse de doctorat (1903). <i>Boudouard</i> . Iron and Steel Institute. (Meeting de Mai 1903).

(1) Il est bien entendu qu'il s'agit ici, comme dans tout ce qui précède, d'un acier recuit.

Résistance électrique....	<i>W. Kohlrausch</i> . Wiedemann Annalen, t. 33 (1888) <i>Hopkinson</i> . Loc. cit. <i>H. Le Chatelier</i> . C.R. Ac Sc., t. 110 (1890). Contri- bution à l'étude des alliages. (Soc. Enc.) <i>Morris</i> . — Loc. cit. <i>Harrison</i> . — Loc. cit. <i>Boudouard</i> . — Loc. cit. Bulletin Soc. Enc., t. 104 (1903).
Résistance à la traction..	<i>James Howard</i> . — Iron Age (1890). <i>André Le Chatelier</i> . — Congrès international des méthodes d'essai. — (1900).
Dureté.....	<i>F. Robin</i> . — Revue de métallurgie (1908).

Les résultats fournis par les différentes méthodes expérimentales sont loin d'être complets et définitifs.

D'une part, certaines parties de ce vaste domaine (propriétés mécaniques, par exemple) ne sont pas encore complètement explorées, en raison des nombreuses difficultés expérimentales qu'on y rencontre.

D'autre part, les conclusions formulées par les différents expérimentateurs ne sont pas rigoureusement concordantes.

Cela tient en grande partie à ce que les diverses propriétés physiques ne sont pas également affectées par une même transformation. De plus, aux températures élevées, de nombreuses causes d'erreurs, dont la plus importante est l'altération du métal, peuvent fausser les résultats.

Les expériences nouvelles devront donc être l'application de méthodes de plus en plus précises et sensibles. D'autre part, il faudra s'attacher à écarter toute cause de modification chimique (décarburation, oxydation, etc.) des échantillons.

Division du présent travail. — Le présent travail comprend deux parties distinctes.

Dans la première, j'ai appliqué la méthode de la résistance électrique à la détermination des transformations de quelques aciers au carbone. J'ai étudié la fonction $f(R, T) = 0$ en dehors des régions de transformation et j'ai montré comment l'allure de cette fonction se trouve modifiée par la présence des éléments étrangers au fer.

L'application de la même méthode m'a permis de suivre d'une façon continue le revenu d'un acier trempé.

Dans la seconde partie, j'ai étudié les courbes de traction fournies à

différentes températures par des fils d'acier. Je me suis préoccupé de préciser l'influence de la rapidité de l'essai sur la forme de ces courbes et sur la valeur de la charge de rupture.

Ces recherches ont été poursuivies au laboratoire de Physique de la Faculté des Sciences de Marseille. Qu'il me soit permis d'adresser ici l'expression de ma vive gratitude à MM. les professeurs Fabry et Houllevigue qui m'ont réservé le plus cordial accueil.

Je tiens également à remercier M. André Le Chatelier du bienveillant intérêt qu'il m'a témoigné et des indications si précieuses qu'il a bien voulu me donner.

Enfin, j'adresse un souvenir ému à la mémoire de M. Osmond qui n'a cessé, dans les dernières années de sa vie, de me prodiguer ses conseils et ses encouragements.

PREMIÈRE PARTIE

RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE

CHAPITRE PREMIER

TRAVAUX ANTÉRIEURS

Courbes de W. Kohlrausch. — (Fig. 2). On doit à W. Kohlrausch les premières recherches effectuées aux températures de transformation.

Les échantillons (fils ou bandes), placés dans une atmosphère de gaz d'éclairage ou d'hydrogène étaient chauffés directement par un courant électrique. L'auteur n'ayant pas mesuré les températures a tracé les courbes représentant les variations de la résistance R en fonction du courant I , et en fonction de la puissance W dépensée à chaque état d'équilibre.

Ces courbes ne sont pas susceptibles d'interprétation précise, puisque la température, en outre de cette puissance, dépend d'un certain nombre d'autres facteurs (conductibilité du milieu extérieur, refroidissement par rayonnement, etc...). Elles ont cependant permis à W. Kohlrausch de montrer que la loi de variation de la résistivité présente un changement brusque qui est en relation avec la perte du ferromagnétisme.

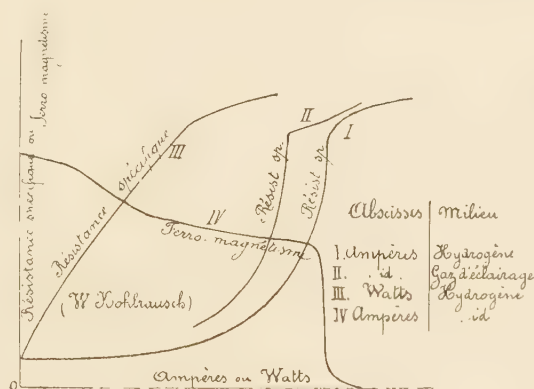


FIGURE 2.

Travaux de MM. J. Hopkinson, H. Le Chatelier, Morris et Harrison (1). — Dans les expériences de J. Hopkinson, les échantillons étaient chauffés à l'aide d'un fourneau à gaz et la température était donnée par la résistance d'une bobine de fil de cuivre (2).

Deux échantillons ont été étudiés :

	C	Mn	S	Si	P
Fil de fer doux.	0,006	0,289	0,15	0,034	0,141 o/o
Fil de piano....	0,724	0,157	0,010	0,132	0,030 o/o

Pour le fer doux, le coefficient de température est de 0,0056 à 0°. Il croît jusqu'à la valeur 0,019 qu'il atteint un peu au-dessous de 855°. A 855°, ce coefficient diminue brusquement et reste égal à 0,007.

Pour le fil de piano, le coefficient de température est, à 0°, de 0,0035. Il croît jusqu'à la valeur 0,017 qu'il atteint un peu au-dessous de 812°. A 812°, il diminue brusquement et devient égal à 0,005 (Fig. 3).

En résumé, les recherches de M. Hopkinson établissent les faits suivants :

1° La méthode de la résistance électrique indique un point de transformation du fer qui s'abaisse dans l'acier.

2° Jusqu'à cette transformation, le coefficient de température est d'autant plus faible que la teneur en carbone est plus élevée.

L'auteur a cherché à déterminer en outre, la température de transformation magnétique de chacun des deux échantillons étudiés. Il a trouvé les nombres suivants : pour le fer doux : 880° ; pour le fil de piano : 838°.

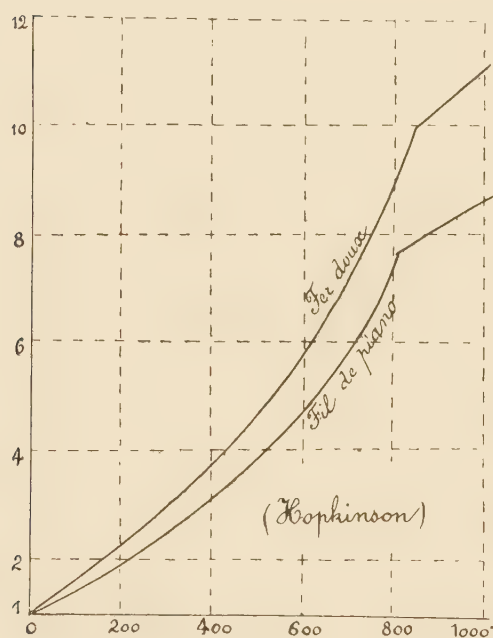


FIGURE 3.

(1) Bibl. Voir page 9.

(2) L'auteur estime que les erreurs commises dans la mesure des hautes températures ont pu atteindre 20°

La perte du ferro-magnétisme se produirait donc à une température, sinon supérieure, au moins égale à celle de la transformation indiquée par la résistance électrique.

Ce résultat est en contradiction, non seulement avec les expériences postérieures de Curie et de K. Morris, mais aussi avec celles de M. Hopkinson indiquées dans le même mémoire.

La méthode de la résistance électrique a été appliquée par M. Henry Le Chatelier à l'étude d'un certain nombre de métaux et d'alliages, parmi lesquels se trouvent les trois échantillons suivants :

Fer doux soudé.	C = 0,05 o/o
Acier mi-dur. . .	C = 0,60 o/o, Mn = 0,40 o/o
Acier dur.	

Les courbes relatives à ces deux derniers alliages ont été tracées en exprimant, en ohms, les résistances rapportées à des fils de 1 mètre de long et de 1 mm de diamètre (Fig. 4).

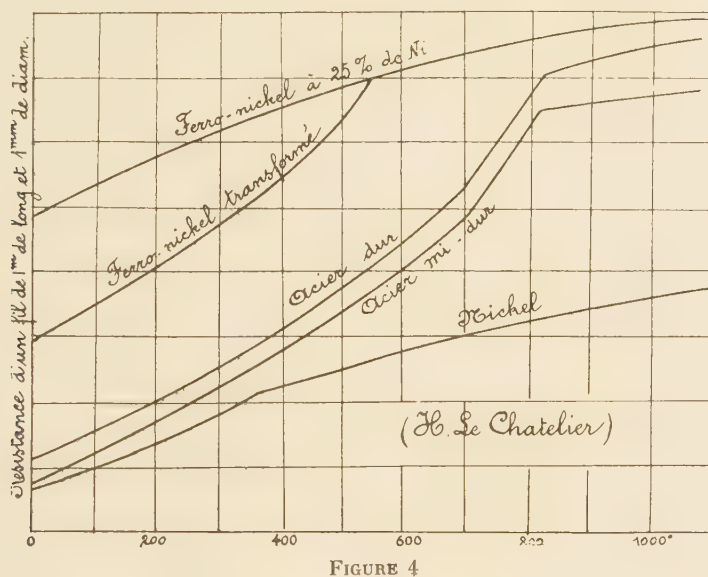


FIGURE 4

Elles présentent deux points anguleux, l'un à 710°, l'autre à 828°-850°, qui « mettent très nettement en évidence les transformations moléculaires et « montrent de plus que les températures de ces transformations sont sensiblement indépendantes de la proportion des matières étrangères alliées au « fer. »

Ces courbes présentent la forme parabolique jusqu'au premier point anguleux. Au delà du second point, la résistivité croît proportionnellement à la

température, comme cela se produit à toute température pour les métaux qui ne présentent pas de transformations.

M. D. K. Morris s'est proposé d'étudier simultanément les variations de la résistance spécifique et de la perméabilité magnétique (champs faibles). Les expériences ont porté sur deux échantillons de fer dont l'un n'a pas été analysé et dont l'autre contenait environ 0,75 o/o d'impuretés (C, Mn Si, .. etc.).

Ceux-ci étaient chauffés en vase clos. La pression avait d'abord été réduite à un tiers d'atmosphère environ et l'oxygène absorbé par une spirale de fil de fer incandescent.

Contrairement aux expérimentateurs précédents M. D. K. Morris a trouvé que les courbes de résistance (Fig. 5) ne présentent pas de changement brusque de direction à la température critique (1). Mais quelques degrés au-dessous de cette température, se trouve un point d'inflexion qui indique un maximum du coefficient de température.

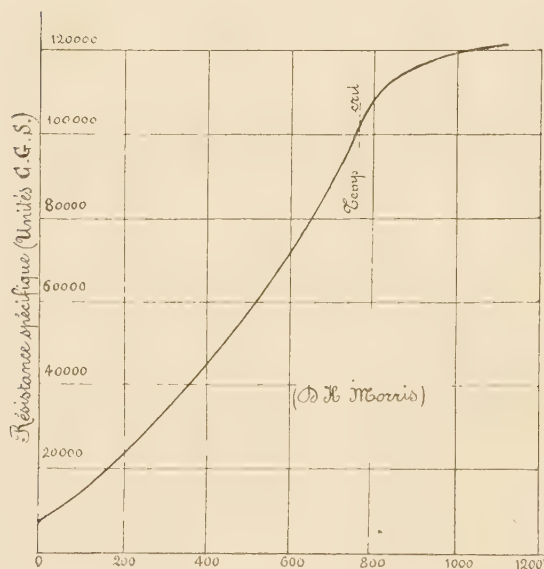


FIGURE 5.

Ainsi, pour l'échantillon le plus pur (2) recuit au préalable à 1150°, le coefficient de température est maximum à 765° ; il est alors égal à 0,024 (sa valeur à 0° est 0,0057).

Enfin, l'auteur signale que, pour ce même échantillon, la courbe présente entre 830° et 900° une partie rectiligne (flat part). A 865°, le coefficient de température est 0,0064 ; à 1000° , il est 0,00244.

Cette conclusion est de la plus grande importance, car elle permet de considérer la courbe de résistance d'un acier à 0,75 o/o d'impuretés comme

formée de trois parties : (a) Une partie parabolique jusqu'au point d'inflexion

(1) L'auteur appelle température critique, celle qui correspond à la chute plus ou moins brusque (suivant la valeur du champ) de la perméabilité magnétique. Il l'indique à 795° pour le premier échantillon et à 780° pour le second.

(2) Celui qui présentait la plus faible résistance spécifique à 0° était l'échantillon analysé (0,75 o/o d'impuretés). A ce titre, l'auteur le considère comme le plus pur.

(b) Une partie rectiligne dans laquelle $\frac{dR}{dt} = 0,0068$; (c) Une dernière partie également rectiligne où $\frac{dR}{dt} = 0,00244$.

D'ailleurs, l'auteur a trouvé que les points de courbure maximum 800° et 920° semblent être en concordance avec les maxima de la courbe de perméabilité obtenue en même temps.

Je ne ferai que citer les expériences de *M. Harrison* dont le principal objet était l'étude des propriétés thermo-électriques du fer et du nickel.

Les mesures de résistance ont été effectuées à titre de vérification et les résultats ne diffèrent pas de ceux obtenus par *Morris*.

Recherches de M. Boudouard. — De toutes les recherches relatives à la variation de la résistance électrique avec la température, celles de *M. Boudouard* sont les plus importantes. Cet expérimentateur a étudié une série d'aciers au carbone, depuis un fer commercial (non analysé) jusqu'à l'alliage à 1,38 o/o de carbone. Il a également appliqué cette méthode à l'étude de quelques aciers spéciaux : aciers au chrome, au tungstène, au manganèse et au nickel.

Les échantillons avaient la forme de barreaux carrés de $20^{\text{cm}} \times 1^{\text{cm}^2}$ ou cylindriques de 1 centimètre de diamètre. Ils étaient chauffés dans un four électrique à résistance.

Les mesures étaient effectuées par une méthode de déviation. Un courant d'environ deux ampères traversait le barreau dont deux points étaient reliés à un galvanomètre. La résistance comprise entre ces deux points était propor-

tionnelle au quotient $\frac{D}{I}$ de la déviation par l'intensité du courant.

En fait, les mesures se sont trouvées compliquées par la présence de différences de potentiel « dues à une inégale répartition de chaleur dans le barreau, cette inégalité provenant elle-même du mode de chauffage employé et des phénomènes qui se produisent dans le barreau aux points critiques. »

Les courbes obtenues ont été construites en prenant pour abscisses les températures et pour ordonnées les valeurs corrigées du quotient $\frac{D}{I}$. Pour effectuer cette correction, l'auteur mesurait simplement la déviation produite par les forces thermo-électriques seules. La figure 6 comprend quelques exemples de ces courbes.

L'auteur, s'étant plus particulièrement préoccupé de déterminer la position

des points de transformation, n'a pas prolongé les courbes au-dessous de 500°.

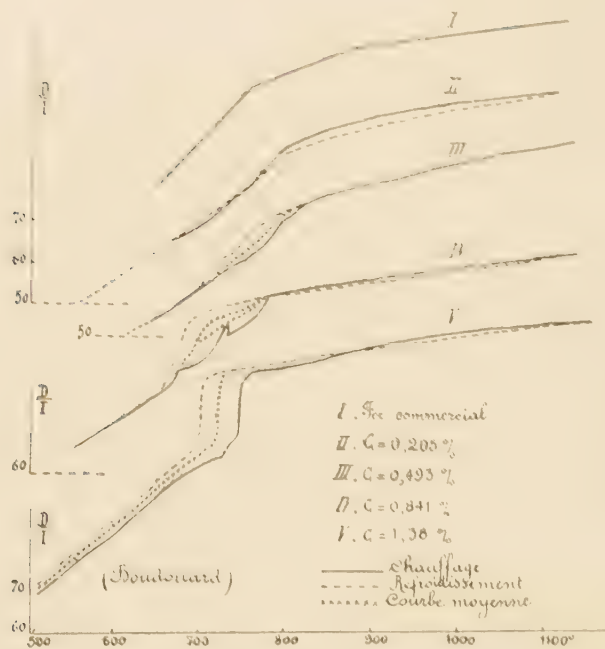


FIGURE 6.

Il résume ainsi les observations qu'il a faites sur les aciers au carbone :
 « Les transformations A_1
 « et A_2 dans les aciers
 « peu carburés n'ont pas
 « beaucoup d'influence
 « sur la résistance élec-
 « trique (1) ; nettement
 « progressives, elles em-
 « brassent un certain
 « intervalle de tempéra-
 « ture. »

« La transformation
 « A_3 est au contraire brus-
 « que, la résistance élec-
 « trique, après avoir
 « beaucoup augmenté de-
 « puis la température
 « ordinaire ne croît plus

« que d'une manière insensible au-dessus de cette température.

« Lorsque la teneur en carbone augmente de plus en plus, comme cela
 « a déjà été observé, les points A_1 A_2 A_3 se rapprochent de plus en plus et
 « finissent par se confondre : le phénomène de transformation, prenant une
 ampleur considérable, devient très visible. »

M. Boudouard a pu remarquer enfin que le point A_3 , 2. 4., indiqué par cette méthode passe par un minimum pour l'acier eutectique ($C = 0,841$ o/o).

Résumé. — En résumé, de toutes les recherches qui viennent d'être citées, il résulte que la transformation A_3 est celle qui agit le plus nettement sur la loi de variation de la résistance électrique.

Les résultats sont plus douteux en ce qui concerne la transformation A_2 — Sur les conseils de M. Osmond, j'ai entrepris quelques expériences dans le

(1). La courbe relative au fer commercial présente cependant, à 775°, un changement très net de direction.

but de vérifier le rôle attribué par ce savant à la variété de fer dite β , dans le durcissement des aciers par la trempe ou l'écrouissage.

Craignant cependant de m'engager dans des discussions auxquelles mes travaux antérieurs ne m'ont pas préparé, je me contenterai d'exposer les faits observés, laissant aux métallurgistes le soin d'en tirer les conclusions.

Quelles que soient d'ailleurs les conséquences de mes mesures au point de vue de l'attaque ou de la défense de la théorie du fer β , il n'en subsiste pas moins que l'ensemble des données numériques ainsi recueillies semble de nature à jeter quelque jour sur la constitution des aciers.

CHAPITRE II

MÉTHODE ET APPAREILS

Mesure des résistances. — La résistance x à mesurer est placée dans le circuit d'un accumulateur, en série avec un ohm étalon et un rhéostat d'une centaine d'ohms.

En mesurant les différences de potentiel E et e aux bornes de la résistance x et de l'ohm étalon, on a immédiatement :

$$x = \frac{E}{e}$$

Cette méthode présente l'avantage d'éliminer les variations de résistance des autres parties du circuit et de ne pas exiger une source de force électromotrice rigoureusement constante.

Mesure des températures. — Les températures étaient mesurées à l'aide d'un couple thermo-électrique Le Châtelier en platine-platine rhodié.

La courbe d'étalonnage, entre 200° et 1600°, est fournie par le constructeur. J'en ai vérifié l'exactitude en mesurant la force électromotrice du couple (1) pour quelques points fixes.

J'ai obtenu les résultats suivants :

Points fixes	F. e. m.
Ebullition de l'eau 100°.....	1020 microvolts,
« de la naphthaline 218°.....	2660 »
Fusion du zinc 420°.....	5700 »
« de l'argent 960° ..	15100 »
« de l'or 1060°.....	17020 »

Au degré de précision des mesures et de l'échelle du graphique, ces résultats ont concordé avec ceux que donne la courbe.

Deux autres vérifications faites en cours d'expériences n'ont pas accusé de variations appréciables de la $f. e. m.$ du couple.

(1) Je me suis conformé, dans ces expériences, aux indications données par MM. Le Châtelier et O. Boudouard dans leur ouvrage : « Mesure des températures élevées », p. 103. — 141.

Au-dessous de 200°, le couple donne encore de bonnes indications, si l'on utilise une méthode de zéro pour la mesure des *f. e. m.*

J'avais établi moi-même la courbe entre 200° et la température ordinaire par comparaison avec un thermomètre à mercure.

M. Le Chatelier a proposé de mettre sous la forme suivante :

$$\log e = A \log t + B,$$

la relation entre la *f.e.m.* et la température.

Dans le cas actuel, en calculant les valeurs de *A* et *B* à l'aide des déterminations faites à 218° et 960°, on obtient :

$$\log e = 1,171 \log t + 0,686,$$

e étant exprimé en microvolts et *t* en degrés centigrades.

En comparant les résultats fournis par la courbe à ceux que donne cette formule, on trouve :

<i>t</i> (lue sur le graphique)	<i>e</i> (id)	<i>t</i> (calculée)	Différences
200°	2380	198° 4	— 1° 6
300°	3860	299°	— 1°
400°	5370	397° 6	— 2° 4'
500°	6990	498°	— 2°
600°	8680	599°	— 1°
700°	10450	702°	+ 2°
800°	12200	801° 5	+ 1° 5
900°	14040	903° 3	+ 3° 3
1000°	15860	1002° 5	+ 2° 5
1100°	17740	1103° 5	+ 3° 5

Ces différences sont de l'ordre de grandeur des erreurs de lecture.

Montage des échantillons. — Les échantillons étaient étirés en fils de de 0^m/m 3 de diamètre. Chacun d'eux était enroulé sur une double feuille de mica (5 c/m + 2 c/m) (*Fig. 7*) portant sur ses bords des encoches dans lesquelles étaient placées les spires de cette petite bobine.

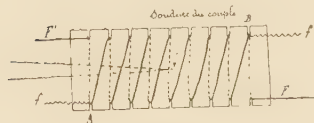


FIGURE 7.

Le fil ainsi disposé et prolongé de part et d'autre en *F* et *F'* constituait le circuit principal. Les fils de potentiel *f* et *f'* portaient des extrémités *A* et *B* de la bobine. Pour éviter la production de forces thermo-électriques, ces fils étaient prélevés dans l'échantillon étudié.

Ce montage permet d'avoir une résistance relativement grande sous un

faible volume, et de placer celle-ci dans une région de température bien uniforme.

Milieu de chauffe. — Les principales altérations dont un acier est susceptible aux températures élevées sont l'oxydation, la décarburation et la surcarburation. M. Belloc (1) a montré que la décarburation se produit toutes les fois que l'on chauffe un acier au-dessus de 800°, dans n'importe quel milieu, et que ce phénomène est lié à la présence des gaz occlus. Lorsque ces gaz ont été extraits par un chauffage modéré sous une pression très réduite (quelques millièmes de millimètres de mercure), il se produit, au contraire, une vaporisation du fer et par suite une surcarburation de l'acier, quand la température s'élève.

Le milieu de chauffe le plus convenable est donc une atmosphère neutre sous une pression de quelques millimètres de mercure.

Appareils. — L'installation comprenait ainsi trois parties principales :

- 1° Un appareil de chauffe ;
- 2° Un appareil à vide ;
- 3° Un appareil de mesures.

L'appareil de chauffe était un four électrique Heraeus à résistance de platine branché sur une distribution à 110 volts. Le courant était réglé au moyen de trois rhéostats comprenant chacun une dizaine de plots. Ce four, qui a la forme d'un cylindre horizontal, porte suivant son axe un tube en porcelaine dégourdie de 40 millimètres de diamètre. A l'intérieur était placé un second tube vernissé dans lequel étaient introduits la bobine du fil à étudier et le couple thermo-électrique. La soudure de ce couple se trouvait entre les deux feuilles de la plaque de mica, exactement au milieu de la bobine.

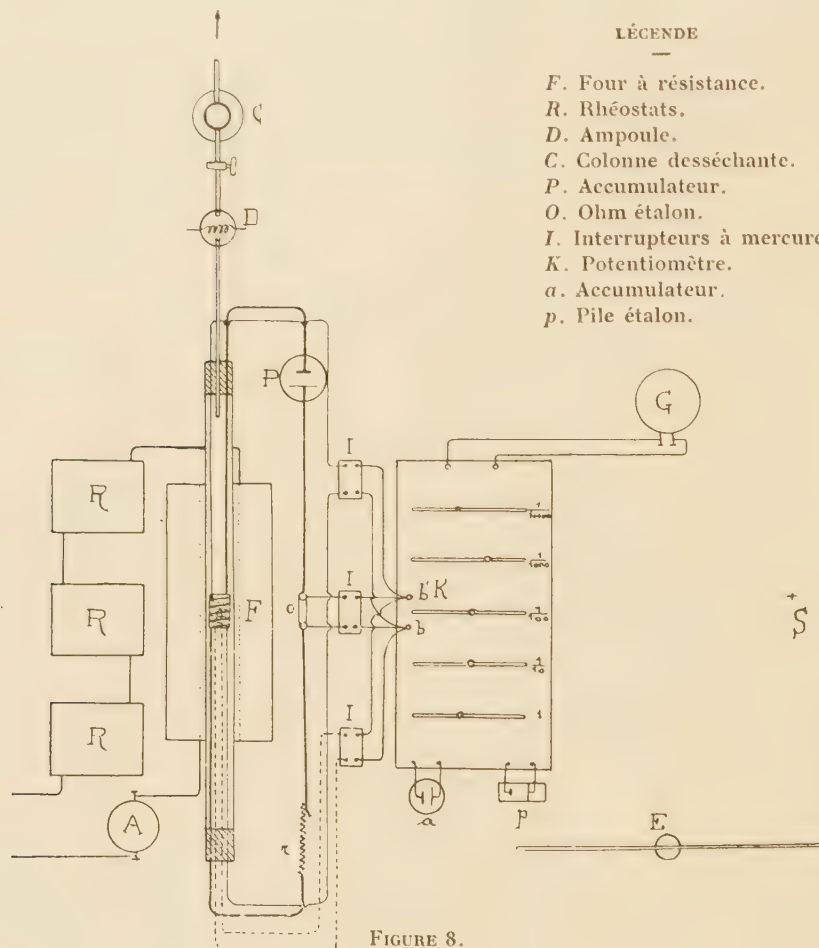
Les fils du circuit principal, les fils de potentiel et ceux du couple étaient isolés les uns des autres par des tuyaux de pipe. Ils sortaient du tube après avoir traversé deux bouchons en caoutchouc soigneusement mastiqués à la glu marine ; l'un de ces bouchons portait en même temps un tube de verre communiquant avec la machine pneumatique. Le tube émergeant sur une longueur de 20 centimètres de chaque côté de l'appareil, les bouchons et le masticage n'étaient pas atteints par la chaleur du four.

Pour faire le vide, j'ai d'abord employé une machine Bianchi qui réduisait aisément la pression à 1 ou 2 millimètres de mercure.

J'ai fait usage par la suite de la pompe rotative Aplex qui donne un vide moins parfait, mais qui est plus commode.

(1) Thermo-électricité du fer et des aciers. Thèse 1903

Entre la machine pneumatique et le tube de chauffe étaient intercalés un tube desséchant à chlorure de calcium C et une ampoule D dans laquelle était suspendue une spirale de fer chauffée au rouge vif par un courant électrique. C'est le procédé qui m'a paru le mieux convenir pour absorber l'oxygène (*Fig. 8*).



Chaque manipulation comprenait la détermination de trois différences de potentiel.

L'emploi du potentiomètre Carpentier m'a permis d'effectuer les mesures avec rapidité et précision. Les fils de potentiel d'une part, les fils du couple d'autre part, étaient mis en relation avec les bornes *b* et *b'* du potentiomètre par l'intermédiaire de trois interrupteurs à mercure I, I' et I'' (*Fig. 8*). Cette disposition n'exigeait qu'un seul galvanomètre G.

La figure 8 donne le schéma de l'installation complète.

Degré de précision des mesures. — (a) *Résistances.* — L'intensité du courant qui traversait le fil, ne pouvait s'écarter au-delà de certaines limites imposées par la nature même des expériences. D'une part, ce courant devrait être assez faible pour ne pas modifier l'état thermique de l'échantillon. D'autre part, il y avait avantage à lui donner la plus grande valeur possible pour pouvoir mesurer les différences de potentiel avec le maximum de précision.

En donnant à ce courant une intensité d'environ 0,08 ampère, les deux conditions se sont trouvées convenablement remplies. La différence de potentiel e aux bornes de l'ohm étalon était donc d'environ 0,08 volt. Les résistances mesurées n'étant jamais inférieures à 0,2 ohm (température ordinaire), la différence de potentiel E avait une valeur minimum d'environ 0,02 volt.

La graduation du potentiomètre s'arrête aux dix millièmes de volt ; mais avec un galvanomètre de sensibilité moyenne, il est facile, par interpolation, d'évaluer les différences de potentiel à 0,00002 volt près.

Les erreurs sur E et e pouvant être de même sens ou de sens contraires, l'erreur relative commise sur le quotient $R = \frac{E}{e}$ est au plus égale à la somme des précédentes.

Soit ε la valeur maximum de cette erreur dans le cas des plus faibles résistances. On a :

$$(1) \quad \varepsilon = \frac{2 \times 10^{-5}}{2 \times 10^{-2}} + \frac{2 \times 10^{-5}}{8 \times 10^{-2}} = 0,00125.$$

Elle est de l'ordre du millième.

Il convient d'ailleurs de remarquer que cette erreur relative diminue à mesure que la température s'élève. La résistance de l'échantillon étant faible par rapport à celle du rhéostat placé dans le circuit, l'intensité du courant varie très peu (de $\frac{1}{100}$ d'ampère au maximum). Le deuxième terme de la somme (1), est à peu près constant, tandis que le premier diminue assez rapidement, à cause de l'augmentation de R et par suite de E .

(b) **Températures.** — Les causes d'erreurs qui peuvent intervenir dans la mesure des températures sont de trois sortes :

- 1° Tracé de la courbe d'étalonnage,
- 2° Mesure de la *f. e. m.* du couple,
- 3° Lecture de la température sur le graphique.

Les erreurs commises dans le tracé de la courbe d'étalonnage influent sur les valeurs absolues des températures ; mais elles sont constantes et par suite ne modifient pas les résultats d'expériences comparatives.

On a vu plus haut que les *dd. p.*, pourraient être évaluées à 20 microvolts près. Or, si l'on se reporte au tableau de la page 25, on voit qu'on peut fixer à 6° environ la variation moyenne de température correspondant à une variation de *f. e. m.* de 100 volts. L'erreur provenant de la mesure de la *f. e. m.* sera donc de 1°5 au maximum.

D'autre part, les plus petites divisions de l'échelle du graphique représentent 100 microvolts. Comme la demi-division s'évalue aisément, la lecture peut être faite à 3° près. Aussi, pour une même température régnant à l'intérieur du four, on peut obtenir deux nombres différant de 4°5. Autrement dit, la comparaison des températures s'effectue avec une approximation de 4 à 5°.

Marche d'une expérience. — La machine pneumatique étant mise en marche, on attend que la pression soit réduite à quelques millimètres de mercure pour porter au rouge la spirale de fer chargée d'absorber l'oxygène. On fait une mesure à la température du laboratoire, puis on met le four en circuit, la résistance de réglage étant au maximum.

La perfection des expérience de cette nature exigerait que l'accroissement de la température fût proportionnel au temps. Malheureusement, il n'est pas possible de satisfaire rigoureusement à cette condition. La seule variable dont on dispose est la résistance des rhéostats à laquelle s'ajoute celle de la bande de platine qui varie notablement avec la température et qui est loin d'être négligeable. Enfin, la température de l'enceinte est une fonction fort complexe de l'intensité du courant.

Mais ce qui importe surtout, c'est que les différentes séries de mesures soient faites dans les mêmes conditions au chauffage et au refroidissement. Par des essais préliminaires, j'avais déterminé une fois pour toutes les valeurs successives à donner à la résistance de réglage pour que l'accroissement de température se fasse régulièrement et que la température maxima (1100°) soit atteinte en quatre heures. Au début du refroidissement, on peut régler la température pour qu'elle décroisse avec la même vitesse qu'à l'échauffement. Mais au-dessous de 300°, en raison de la masse du four, le refroidissement est extrêmement lent. Avec l'appareil employé ici, il fallait, après rupture du courant, attendre plusieurs heures pour revenir à la température ordinaire. C'est pourquoi je n'ai retenu que les résultats obtenus à l'échauffement. On a désigné par E et e les différences de potentiel aux bornes de la résistance à mesurer et aux bornes de l'ohm étalon ; appelons ϵ la *f. e. m.* du couple thermo-électrique. A chaque mesure, je déterminais les valeurs de ces quantités dans l'ordre suivant : $E, \epsilon, e, \epsilon, E$. Dans le cas où la température n'était pas rigoureusement constante, j'obtenais ainsi la valeur moyenne de E correspondant à la valeur moyenne de ϵ ,

CHAPITRE III

RÉSULTATS

Les mesures ont été effectuées sur huit échantillons. Pour plus de clarté, je n'ai représenté dans le graphique ci-après (*Fig. 9*) que les courbes relatives aux cinq échantillons suivants dont les compositions sont nettement différentes.

Échantillons	C o/o	Si o/o	Mn o/o
I	0,08	0,24	0,43
II	0,11	0,02	0,35
III	0,22	0,33	0,57
IV	0,37	0,126	0,47
V	1,05	?	0,25

L'examen micrographique a montré que la répartition du carbone n'était pas tout à fait homogène dans une même section droite du fil. Dans tous les cas, la partie centrale était un peu plus carburée que la périphérie.

On trouvera, dans les tableaux ci-dessous, les nombres qui ont permis de tracer les courbes de la figure 9. Ces nombres ont été obtenus pendant un premier échauffement, les échantillons ayant été au préalable recuits à 1000°. J'ai désigné par R_0 la résistance de l'échantillon à 0°, et par R_t sa résistance t° . J'ai donné, pour le premier échantillon, le tableau complet des mesures et, pour les quatre autres, les résultats définitifs. La *f. e. m.* du couple ϵ et les différences de potentiel E et e sont exprimées en cent millièmes de volt.

ÉCHANTILLON I

$$R_0 = 0^w, 220$$

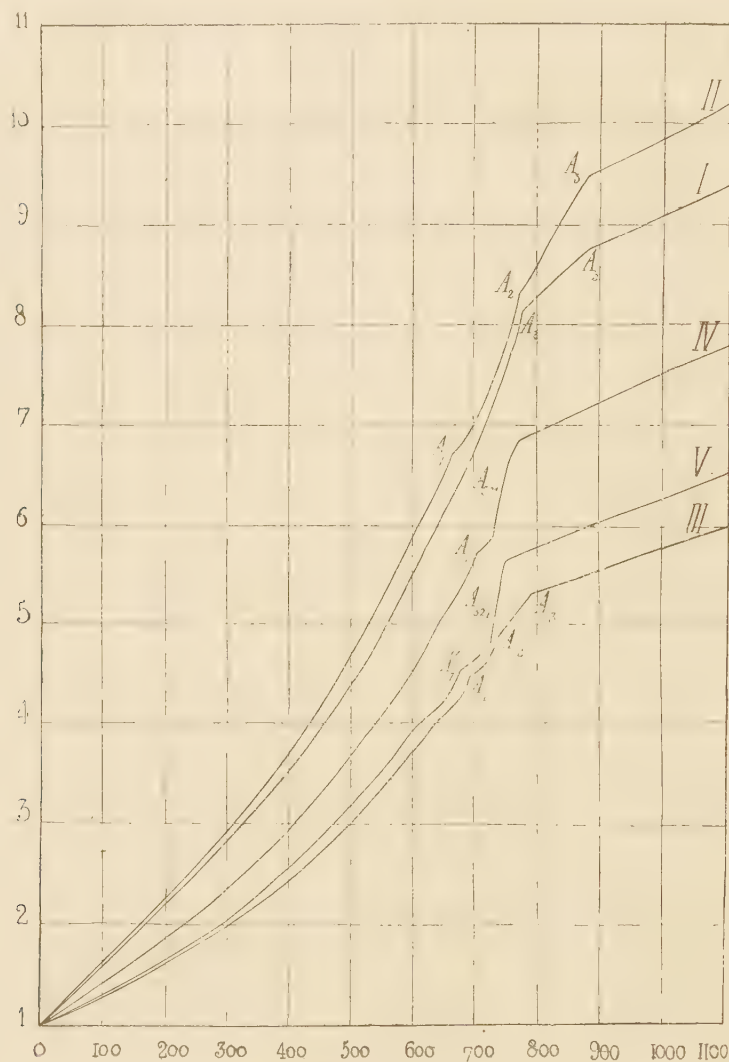
ε	E	e	Rt	l	$\frac{Rt}{R_0}$
$52^v \times 10^{-5}$	$2874^v \times 10^{-5}$	$9775^v \times 10^{-5}$	$0^w, 294$	60^o	1,336
86	3286	9724	0,338	92	1,536
180	4154	9638	0,431	157	1,959
240	4640	9550	0,486	202	2,210
295	5103	9486	0,538	238	2,445
360	5896	9388	0,628	283	2,854
419	5986	9322	0,642	320	2,918
518	6755	9200	0,734	385	3,336
546	7172	9146	0,784	406	3,563
612	7662	9056	0,846	440	3,845
674	8316	8940	0,930	478	4,227
740	8908	8784	1,014	524	4,609
791	9348	8688	1,076	557	4,891
830	9912	8672	1,143	578	5,195
878	10345	8580	1,216	605	5,527
926	11036	8495	1,298	632	5,900
980	11502	8376	1,373	662	6,240
991	11716	8350	1,403	670	6,377
1024	12042	8310	1,449	688	6,586
1102	13146	8242	1,507	709	6,850
1115	13430	8190	1,595	740	7,450
1138	13735	8135	1,688	755	7,672
1154	14038	8070	1,739	762	7,904
1182	14325	8014	1,788	780	8,127
1204	14450	7980	1,810	790	8,227
1236	14526	7916	1,835	814	8,341
1282	14700	7850	1,872	836	8,509
1316	14758	7800	1,892	855	8,600
1340	14786	7786	1,899	867	8,631
1372	14822	7760	1,908	885	8,672
1401	14876	7732	1,924	900	8,745
1466	14958	7682	1,947	935	8,850
1502	15064	7674	1,963	957	8,922
1559	15185	7658	1,982	982	9,009
1591	15268	7649	1,996	1004	9,072
1640	15364	7624	2,014	1028	9,154
1684	15440	7610	2,029	1052	9,223
1768	15628	7586	2,060	1095	9,364

ÉCHANTILLONS II, III, IV et V

II		III		IV		V	
t	$\frac{Rt}{R_0}$	t	$\frac{Rt}{R_0}$	t	$\frac{Rt}{R_0}$	t	$\frac{Rt}{R_0}$
54°	1,308	62°	1,168	57°	1,262	56°	1,174
83	1,542	98	1,252	86	1,327	86	1,258
152	1,981	144	1,387	165	1,625	172	1,556
195	2,252	206	1,608	202	1,880	212	1,655
255	2,560	292	1,927	240	2,041	258	1,850
278	2,744	344	2,203	302	2,345	315	2,093
324	3,011	365	2,325	380	2,827	369	2,402
388	3,527	421	2,606	400	2,951	404	2,589
428	3,935	464	2,823	440	3,269	435	2,775
449	4,115	496	2,985	483	3,566	487	3,110
498	4,597	524	3,174	510	3,772	506	3,248
528	5,076	552	3,372	536	3,978	535	3,386
553	5,261	588	3,627	579	4,363	570	3,649
583	5,628	623	3,885	612	4,633	586	3,834
619	6,126	640	4,005	645	5,024	620	4,094
648	6,612	650	4,088	659	5,172	647	4,195
664	6,753	662	4,161	672	5,296	658	4,303
675	6,807	672	4,222	682	5,412	669	4,438
687	6,892	684	4,342	690	5,493	678	4,604
698	6,963	697	4,511	696	5,627	696	4,662
715	7,110	718	4,633	710	5,766	712	4,673
727	7,267	728	4,710	726	5,915	725	4,845
741	7,625	735	4,798	744	6,384	748	5,470
752	7,807	750	5,003	751	6,527	766	5,688
778	8,234	766	5,161	757	6,621	773	5,719
796	8,453	793	5,301	770	6,736	798	5,789
814	8,719	828	5,403	782	6,803	816	5,835
830	8,957	860	5,484	824	7,021	832	5,876
864	9,341	895	5,579	846	7,109	854	5,908
882	9,463	917	5,628	876	7,209	889	5,968
918	9,545	956	5,716	924	7,321	915	6,055
943	9,649	990	5,783	957	7,393	938	6,122
981	9,783	1008	5,823	990	7,466	967	6,154
1002	9,853	1035	5,858	1008	7,506	1014	6,278
1042	9,990	1054	5,900	1028	7,602	1036	6,345
1074	10,118	1092	5,995	1047	7,653	1090	6,457
1100	10,191	»	»	1096	7,774	»	»

REMARQUES SUR LA FORME DES COURBES $R = f(t)$.

1°) Le mode de représentation adopté donne un faisceau de courbes ayant pour extrémité commune l'origine des coordonnées.



• FIGURE 9.

Il est intéressant d'abord de constater que ces courbes ne se rangent pas dans le plan des coordonnées suivant la simple teneur en éléments étrangers. Chacun de ces éléments semble intervenir avec son importance propre pour modifier le coefficient de température. Désignons par S le nombre obtenu en faisant, pour chaque échantillon, la somme des produits des teneurs par les poids atomiques :

$$S = 12C + 28,4 Si + 55 Mn ,$$

On obtient alors les nombres suivants :

Échantillons	S
II.....	21,14
I.....	31,42
IV.....	33,87
V.....	Si non dosé
III.....	43,36

C'est précisément dans cet ordre que se rangent les courbes.

Le nombre des échantillons étudiés est évidemment trop restreint pour qu'on puisse déduire de cette concordance un principe général. Il n'en ressort pas moins une indication intéressante sur les rôles respectifs du Carbone, du Silicium et du Manganèse dans la variation de la résistance avec la température.

Barus et Strouhal avaient déjà montré (1) (les échantillons n'ont malheureusement pas été analysés) que le coefficient de température, entre 0 et 100° est une fonction définie de la résistance spécifique. Le coefficient de température diminue suivant une loi parabolique, quand la résistance spécifique augmente. Il ne semble pas toutefois que ces deux grandeurs soient affectées de la même façon par les éléments étrangers au fer.

M. Benedicks (2) a trouvé, en effet, que la résistivité σ d'un acier à la température ordinaire peut être exprimée d'une manière très approximative par la formule :

$$\sigma = [7,6 + 26,8 \Sigma C] \text{ microhms centimètres}$$

dans laquelle

$$\Sigma C = C + \frac{12,0}{28,4} Si + \frac{12,0}{55} Mn .$$

Cette expression a une signification différente de celle que j'ai désignée par S.

2°) Au-dessus du point A_3 , la résistance électrique croît proportionnellement à la température. Elle s'exprime avec exactitude par la formule :

$$R_t = R_{900} [1 + \alpha (t - 900)]$$

(1) Bulletin of the U. S. Géological Surwey. N° 14, 1885.

(2) Recherches physiques et physico-chimiques sur l'acier au carbone. Thèse de l'Université d'Upsal (1904).

Le coefficient de variation est alors beaucoup plus faible qu'aux températures inférieures à la région de transformation. Il n'est d'ailleurs que peu influencé par la présence des éléments étrangers au fer. Les échantillons étudiés ont donné, pour α , les valeurs suivantes :

Échantillons	α
II.....	$3,3 \times 10^{-4}$
I.....	$3,3 \times 10^{-4}$
IV.....	$3,8 \times 10^{-4}$
V.....	$4,0 \times 10^{-4}$
III.....	$4,3 \times 10^{-4}$

3° Les mêmes expériences nous ont permis de constater le fait impor-

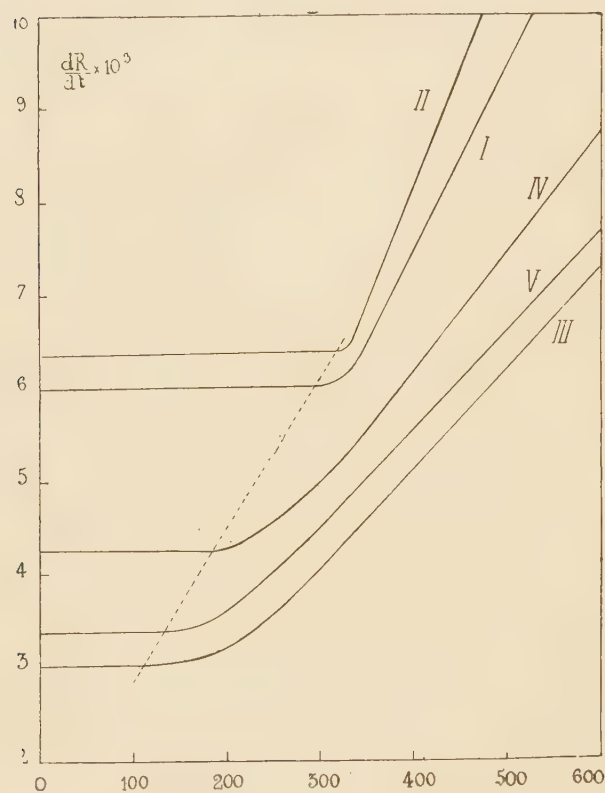


FIGURE 10.

tant suivant : Lorsqu'on chauffe un acier normal à partir de la température ordinaire, sa résistance électrique croît d'abord suivant une loi presque rigoureusement linéaire, puis, à partir d'une température qui dépend de la composition de l'alliage, la courbe se relève et devient parabolique.

Pour mettre nettement ce fait en évidence, j'ai représenté (Fig. 10), les variations de $\frac{dR}{dt}$ en fonction de t . On obtient ainsi, pour chaque échantillon, un ensemble de deux droites : une parallèle à l'axe des températures, et une oblique. Ces

deux droites se raccordent à une température d'autant plus basse que la valeur de S est plus grande.

Variation, pendant le revenu, de la résistance électrique d'un acier trempé. — L'étude du revenu d'un acier trempé peut se faire suivant deux méthodes différentes.

Dans la première, après avoir déterminé les valeurs des diverses grandeurs physiques qui caractérisent l'échantillon trempé (densité, dureté, charge de rupture, résistance électrique, magnétisme rémanent, etc...), on chauffe cet échantillon à une température et pendant un temps donné, puis on le laisse refroidir lentement. De nouvelles mesures indiquent les changements produits par ces revenus sur les propriétés de l'acier.

En répétant cette opération pour des températures de revenu différentes, on détermine celle pour laquelle les propriétés de l'acier trempé ont complètement disparu. Cette méthode *discontinue* a été employée par la plupart des expérimentateurs (Strouhal et Barus, Fromme, Heyn, Maurer, etc.).

La seconde méthode, qui est *continue*, consiste à suivre pendant le chauffage même la variation d'une des propriétés physiques de l'échantillon et à observer les anomalies présentées par cette variation. C'est ainsi qu'ont procédé MM. Charpy et Grenet dans leurs essais dilatométriques (1).

Les recherches de Barus et Strouhal et de M. Maurer, relatives à la variation de la résistance électrique par le revenu, se rattachent à la première méthode. Elles montrent que la résistance d'un acier trempé diminue à mesure que la température de revenu s'élève, mais que, dès 300°, il n'y a presque plus de changement. A ce moment, la résistance a repris la même valeur qu'avant la trempe.

Il m'a paru intéressant d'appliquer la méthode continue à l'étude de la même grandeur. Les expériences ont été effectuées sur un échantillon présentant la forme d'un fil de 0^m/_m 3 de diamètre ayant la composition suivante :

C	Si	Mn
0,65 o/o	0,23 o/o	0,39 o/o

Le fil, enroulé en hélice est fixé à ses extrémités à deux bornes B et B' (Fig. 11) supportées par un cylindre C en terre de pipe. A ces bornes aboutissent deux paires de fils *f* et *f'*, *f*₁ et *f'*₁. Les premiers qui sont plus gros sont utilisés pour chauffer, par un courant électrique, le fil à tremper.

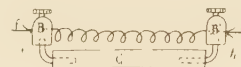


FIGURE 11.

Les autres servent pour la mesure de la résistance par la méthode du pont double.

L'échantillon est alors porté à une température d'environ 900° et trempé à l'eau froide. Lorsqu'on utilise ce procédé de chauffage, il n'est guère possible de mesurer exactement la température de trempe. Pour les expériences dont

(1) *Bulletin Soc, Encouragement*, 1903, p. 464.

il s'agit ici, il suffisait que cette température fût la même dans tous les cas, c'est-à-dire que l'intensité du courant eût la même valeur.

Lorsque le fil est trempé, il est placé avec son support dans le four électrique.

La vitesse de chauffe ayant une influence très grande sur la marche du phénomène, il importait que cette vitesse fût rigoureusement la même dans toutes les séries de mesures. Le courant de chauffe était réglé de manière à obtenir une élévation moyenne de 20° en 10 minutes.

PREMIÈRE EXPÉRIENCE

Résistance de l'échantillon avant la trempe $r = 0^{\omega}$, 552.

» » après » $R = 0^{\omega}$, 945.

$$\frac{R}{r} = 1,711$$

L'échantillon est chauffé jusqu'à 350°, maintenu pendant douze heures à cette température, puis refroidi lentement.

Dans le tableau suivant, R désigne la résistance initiale (à 20°) de l'échantillon trempé ; R_t est la résistance mesurée pendant le revenu à la température t .

CHAUFFAGE		CHAUFFAGE		REFROIDISSEMENT (suite)	
Températures	Valeurs de $\frac{Rt}{R}$	Températures	Valeurs de $\frac{Rt}{R}$	Températures	Valeurs de $\frac{Rt}{R}$
20°	1	237°	1,192	280°	1,210
45°	1,047	248°	1,206	264°	1,166
62°	1,074	258°	1,216	248°	1,122
74°	1,095	268°	1,227	232°	1,094
90°	1,116	275°	1,238	220°	1,071
100°	1,121	290°	1,259	207°	1,035
110°	1,112	302°	1,291	194°	1,014
120°	1,100	314°	1,312	180°	0,986
130°	1,086	320°	1,338	170°	0,952
145°	1,071	340°	1,361	155°	0,935
152°	1,075	350°	1,382	142°	0,901
160°	1,096	Au bout de 12 heures		126°	0,867
170°	1,111	350°	1,360	98°	0,802
188°	1,137	Refroidissement		85°	0,768
196°	1,142	330°	1,313	70°	0,749
205°	1,153	320°	1,272	52°	0,708
215°	1,164	296°	1,249	40°	0,682
230°	1,174			20°	0,640

Les résultats de cette expérience sont représentés, dans la figure 12, par les courbes I_c (Chauffage) et I_r (refroidissement). La variation de résistance à la température constante de 350° est représentée par un trait pointillé :

DEUXIÈME EXPÉRIENCE

Résistance de l'échantillon avant la trempe $r = 0^\omega$, 483

» » après » $R = 0^\omega$, 838

$$\frac{R}{r} = 1,734$$

L'échantillon est chauffé jusqu'à 150°, maintenu pendant douze heures à cette température, puis refroidi lentement. Il est ensuite chauffé jusqu'à 500° et refroidi sans arrêt à cette température.

1 ^{er} CHAUFFAGE		1 ^{er} REFROIDISSEMENT (suite)		2 ^{me} CHAUFFAGE (suite)	
Températures	Valeurs de $\frac{Rt}{R}$	Températures	Valeurs de $\frac{Rt}{R}$	Températures	Valeurs de $\frac{Rt}{R}$
20°	1	65°	0,815	400°	1,564
40°	1,044	57°	0,800	420°	1,640
50°	1,054	45°	0,775	437°	1,694
70°	1,078	20°	0,741	465°	1,791
90°	<u>1,115</u>	2 ^{me} Chauffage		480°	1,856
100°	<u>1,119</u>	50°	0,794	500°	1,911
110°	<u>1,112</u>	65°	0,812	2 ^{me} Refroidissement	
120°	<u>1,093</u>	73°	0,840	472°	1,766
126°	1,080	84°	0,873	450°	1,680
132°	1,074	102°	0,897	427°	1,584
137°	1,070	110°	0,908	395°	1,434
150°	1,072	125°	0,934	350°	1,303
Après 3 heures		142°	0,974	312°	1,211
150°	1,038	160°	1,014	277°	1,104
Après 12 heures		170°	1,033	240°	1,034
150°	0,990	195°	1,078	215°	0,961
1 ^{er} Refroidissement		217°	1,118	192°	0,902
140°	0,970	237°	1,168	172°	0,859
125°	0,946	265°	1,196	130°	0,792
115°	0,912	315°	1,310	102°	0,741
105°	0,885	330°	1,352	87°	0,696
85°	0,850	350°	1,414	55°	0,644
75°	0,838	375°	1,472	20°	0,596

Les courbes II_c et II_r représentent la variation de résistance pendant le premier chauffage et le premier refroidissement ; les courbes II'_c et II'_r se rapportent au deuxième chauffage et au deuxième refroidissement,

Le fait le plus caractéristique établi par ces expériences est la *diminution de résistance électrique* qui se produit entre 100° et 150°.

Cette constatation permettrait donc de placer dès 100° (au moins pour l'échantillon étudié) le début de la transformation : martensite $\longrightarrow$ troostite.

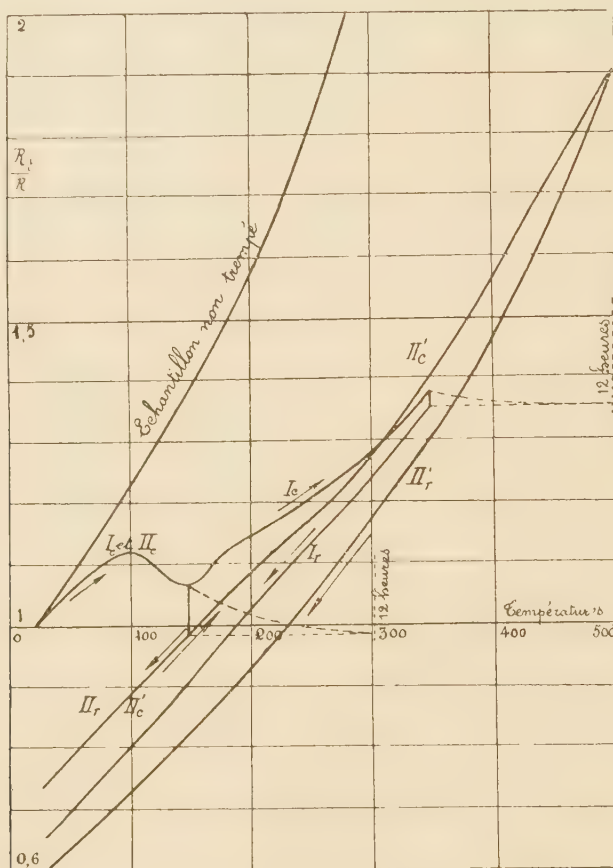


FIGURE 12.

Cette transformation se poursuit jusqu'à des températures plus élevées, mais au-dessus de 150°, l'augmentation de résistivité de chacun des constituants est supérieure à la diminution qui résulte de la transformation. La courbe se relève alors après avoir présenté un minimum vers 150° (1).

Les courbes en pointillé montrent (ce qui pouvait d'ailleurs être prévu) que le système est d'autant moins stable que la température est moins élevée. Ainsi, à 350°, la résistance n'a diminué que faiblement au bout de douze heures ;

(1) Un point d'inflexion assez incertain semble se présenter vers 250°.

à la température de 150°, le rapport $\frac{Rt}{R}$ décroît de 1,072 à 0,990 pendant le même temps.

Sur le même graphique est représentée la variation de résistance de l'échantillon non trempé. On remarquera que le coefficient de température, de la perlite est notablement plus élevé que celui de la martensite dans la zone de stabilité de celle-ci (1).

Expériences avec l'air liquide. — J'ai effectué à la température d'ébullition de l'air liquide quelques expériences dont les résultats peuvent se rattacher à ceux qui précèdent.

J'ai utilisé l'échantillon à 0,08 o/o de C. de la première série de mesures et l'échantillon précédent à 0,65 o/o de C. Pour l'immersion dans l'air liquide, le fil était enroulé sur une feuille de mica. Les résistances étaient mesurées par la méthode potentiométrique.

Je désigne par R la résistance à 0° avant l'immersion, par r la résistance pendant l'immersion et par R_1 la résistance à 0° après l'immersion.

Voici les résultats obtenus :

1° Échantillon à 0,08 o/o de carbone (Recuit)

$$R = 0^\omega, 192$$

$$r = 0^\omega, 0363$$

$$R_1 = 0^\omega, 192$$

d'où
$$\frac{r}{R} = 0, 189$$

et
$$\frac{R_1}{R} = 1$$

2° Échantillon à 0,65 o/o de carbone (Recuit)

$$R = 0^\omega, 350$$

$$r = 0^\omega, 146$$

$$R_1 = 0^\omega, 341$$

d'où :

$$\frac{r}{R} = 0,417$$

et
$$\frac{R_1}{r} = 0,974.$$

(1) A l'origine des courbes, ce coefficient est 0,0035 pour l'acier recuit et 0,0022 pour l'acier trempé.

3°) Échantillon à 0,65 o/o de C (trempé)

$$R = 0^{\omega}, 776$$

$$r = 0^{\omega}, 766$$

$$R_1 = 0^{\omega}, 765$$

$$\frac{r}{R} = 0,987$$

$$\frac{R_1}{R} = 0,986$$

4°) Les mêmes mesures ont été effectuées sur un échantillon de ferro-nickel (Ni = 25 o/o).

$$R = 0^{\omega}, 666$$

$$r = 0^{\omega}, 287$$

$$R_1 = 0^{\omega}, 401$$

d'où :

$$\frac{r}{R} = 0,430$$

$$\frac{R_1}{R} = 0,602$$

Ces quelques résultats montrent que la diminution relative de résistivité est d'autant moindre que l'acier est plus carburé, ce qui est conforme à la loi générale.

On remarquera, en outre, que la résistivité de l'échantillon trempé, mesurée à la température de l'air liquide, ne diffère que de $\frac{13}{1000}$ de sa résistivité à 0°.

De ce fait, et de ceux que l'on a observés à l'échauffement, il résulte donc que *la solution du carbone a pour effet de diminuer considérablement le coefficient de température d'un acier.*

Les résultats fournis par le ferro-nickel à 25 o/o Ni m'ont permis de compléter ceux que j'ai obtenus dans une autre série d'expériences. Celles-ci ont consisté à étudier au chauffage, jusqu'à 900°, et au refroidissement, la variation de résistivité d'un échantillon d'abord transformé par immersion dans l'air liquide.

Le tableau suivant comprend les mesures effectuées. La résistance initiale prise pour unité est la quantité désignée plus haut par R_1 .

FERRO-NICKEL TRANSFORMÉ

 R_1 = Résistance à 0° avant chauffage

1 ^{re} CHAUFFE		1 ^{er} REFROIDISSEMENT		2 ^{me} CHAUFFE		2 ^{me} REFROIDISSEMENT	
t	$\frac{Rt}{R_1}$	t	$\frac{Rt}{R_1}$	t	$\frac{Rt}{R_1}$	t	$\frac{Rt}{R_1}$
48°	1,068	865°	3,325	57°	1,912	856°	4,011
80	1,116	842	3,389	90°	2,028	834	4,002
130	1,187	827	3,397	130	2,187	818	3,991
172	1,240	806	3,403	173	2,341	782	3,973
206	1,312	789	3,889	210	2,469	755	3,952
248	1,348	752	3,889	237	2,536	718	3,914
299	1,433	710	3,365	278	2,605	686	3,882
327	1,475	688	3,324	321	2,711	664	3,856
370	1,552	664	3,317	358	2,848	628	3,806
392	1,614	640	3,300	396	2,951	606	3,764
424	1,653	618	3,262	433	3,019	573	3,737
464	1,788	590	3,246	464	3,075	545	3,612
482	1,878	565	3,213	497	3,108	504	3,548
522	2,094	501	3,114	520	3,129	482	3,480
560	2,348	472	3,065	572	3,276	444	3,385
586	2,376	451	3,037	608	3,354	382	3,202
610	2,422	408	2,969	634	3,403	344	3,105
635	2,465	375	2,870	667	3,492	300	2,944
644	2,511	327	2,808	685	3,526	285	2,902
694	2,577	280	2,651	732	3,634	238	2,726
725	2,623	244	2,544	755	3,700	198	2,583
742	2,692	213	2,484	784	3,748	160	2,442
765	2,781	198	2,405	824	3,859	106	2,200
800	2,847	146	2,225	845	3,874	78	2,046
836	2,962	92	2,028	878	3,971	54	1,947
864	3,061	60	1,906	902	3,996	0	1,688
898	3,255	0	1,702				

Ces résultats sont traduits graphiquement dans la figure 13. On remarquera que le début de la courbe de chauffage est rigoureusement rectiligne. Prolongeons cette droite à gauche de l'axe Oy jusqu'à -194° (Température d'ébullition de l'air liquide). L'ordonnée du point obtenu est 0,7. C'est la valeur du rapport $\frac{r}{R_1}$ calculée d'après les résultats précédents ($r = 0^{\omega},287$;

$$R_1 = 0^{\omega},401 ; \quad \frac{r}{R_1} = 0,72.$$

La zone de stabilité de la phase β correspond à toute cette région rectili-

gne de la courbe. L'apparition de la phase α produit un relèvement de la courbe. Celle-ci change brusquement de direction à 560° , ce qui indique la fin de la transformation.

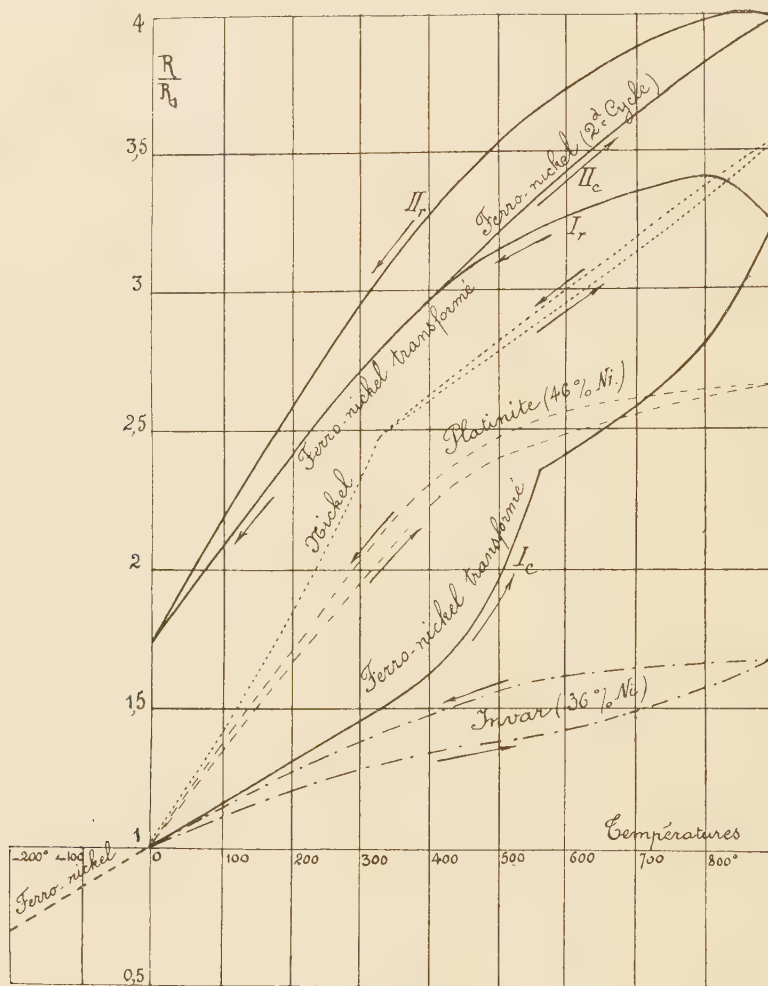


FIGURE 13.

La courbe de refroidissement rencontre l'axe Oy en un point d'ordonnée 1.70. A ce moment, la résistance a repris la valeur désignée par R dans les mesures précédentes. En prenant les résultats de ces mesures, on trouve en effet : $\frac{R}{R_1} = 1.66$.

Sur la même figure est représentée la variation de résistance de cet échantillon pendant un second cycle. On a figuré également les courbes relatives au nickel pur, à l'invar ($Ni = 36$ o/o) et au platinite ($Ni = 46$ o/o).

CONCLUSIONS DE LA PREMIÈRE PARTIE

Les principaux faits établis dans cette première partie sont les suivants :

1° Grâce à l'emploi de procédés de mesure assez sensibles, les différentes transformations des aciers peuvent être mises en évidence par la méthode de la résistance électrique. Le début des transformations progressives est indiqué par un changement de direction de la courbe $\frac{dR}{dt} = f(t)$.

2° Cette méthode permet également de suivre d'une façon continue le revenu d'un acier trempé. Il se produit pendant ce revenu une diminution de résistance électrique qui s'étend sur l'intervalle 100° — 150° et qui permet de fixer vers cette température le début de la transformation : martensite — troostite.

3° La présence d'éléments étrangers au fer diminue le coefficient de température. Cette diminution n'est pas fonction seulement de la teneur totale de ces éléments, mais elle dépend aussi de la nature.

La dissolution du carbone (trempe) influe également et dans le sens d'une diminution sur ce coefficient.

Les expériences faites à la température de l'air liquide s'accordent avec ces résultats.

4° La méthode de la résistance électrique met très nettement en évidence les transformations irréversibles du ferro-nickel, préalablement refroidi à la température de l'air liquide.

DEUXIÈME PARTIE

COURBES DE TRACTION

CHAPITRE IV

HISTORIQUE

L'étude de la résistance à la traction du fer et des aciers, à différentes températures, a fait l'objet d'un nombre considérable de recherches. Parmi les résultats qu'elles ont fournis, il y a lieu de distinguer : 1° *les résultats numériques* qui caractérisent, pour chaque température, les qualités des métaux étudiés ; 2° *les courbes de traction* qui indiquent la marche de la déformation.

RÉSULTATS NUMÉRIQUES

(a) **Charge de rupture.** — Dès 1850, Baudrimont (1) avait signalé le fait caractéristique suivant : « la résistance à la rupture du fer décroît de 0° à 100° et croît de 100° à 200° ».

La même propriété a été observée depuis lors par tous les expérimentateurs, sauf Kollmann (2), qui indique une diminution constante de la ténacité. D'après Rudeloff (3) et Howard (4), le fer soudé ne présenterait pas de diminution entre 0° et 100°.

Les résultats relatifs aux aciers, au carbone, sont nettement concordants. Je citerai ceux qui ont été obtenus par M. André Le Chatelier (5), dans des expériences particulièrement précises sur les trois échantillons suivants :

(1) Annales de Chimie et de Physique. Vol. 30, année 1850.

(2) Verhandlungen des Vereines Zür Beforderung des Gewerbflusses (année 1880).

(3) Mitteilungen a. d. Kgl. Technischen Versuchsanstalten Zü Berlin (1895-1900).

(4) Iron Age, 1890.

(5) Congrès international des méthodes d'essai des matériaux de construction.

	C	Mn
Fer de Suède.....	0,086	0,000
Acier extra-doux...	0,163	0,280
Acier doux.....	0,261	0,615

Les conclusions de l'auteur sont ainsi formulées :

« Si l'on observe les courbes (1) relatives à la traction lente (*Fig. 14*), on
 « constate que la charge de rupture décroît très rapidement depuis la tempé-
 « rature ordinaire jusqu'à une température d'autant plus élevée que le métal
 « est plus dur (60° pour le fer de Suède, 100° pour l'acier doux), au delà de
 « laquelle elle se relève rapidement. Elle atteint son maximum vers 250° à
 « 300° (2) ; la différence entre ce maximum et la charge de rupture à la tempé-
 « rature ordinaire est presque constante ; la valeur de ce maximum est de
 « 8 à 10 kilogrammes.

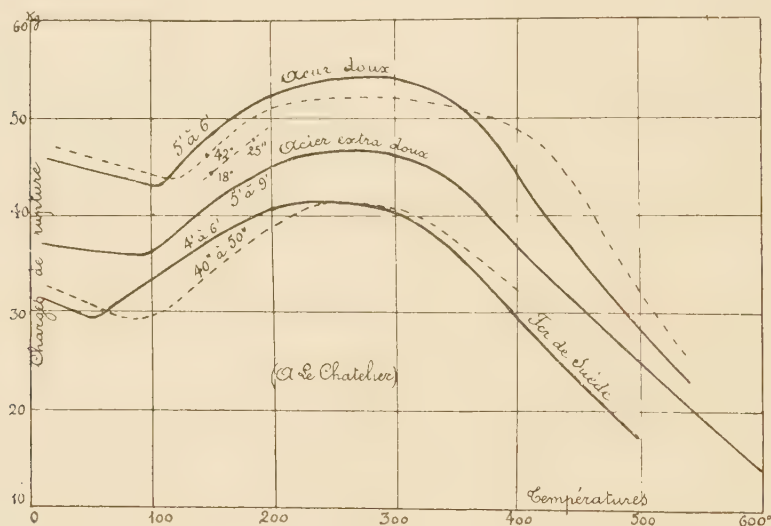


FIGURE 14.

« Au delà de ce maximum, la charge de rupture décroît rapidement. »

M. Le Chatelier est le premier expérimentateur qui ait étudié systématiquement l'influence de la vitesse de traction sur la charge de rupture. Il a constaté ainsi que de 100° à 200°, la charge de rupture est d'autant plus élevée que l'essai est plus rapide. Au delà de 300°, c'est l'inverse qui se produit.

(1) Ces courbes représentent la variation de la charge de rupture en fonction de la température.

(2) Pour le fer soudé, ce maximum est indiqué à 260° par Rudeloff (*loc. cit.*) et à 250° par Carpentier (*Engineering* 1896, vol. 1).

Les expériences plus récentes de M. Le Blant (1), ont été poussées jusqu'à 1000°.

En outre des résultats antérieurement établis, elles ont permis de constater, sur trois échantillons d'acier, que la résistance à la rupture, après avoir diminué considérablement de 300° à 800°, se relève légèrement et présente un palier vers 900°; elle diminue ensuite.

Cette particularité est à retenir, car elle coïncide dans l'échelle des températures avec la position du point A₃ de transformation du fer.

(b) **Allongement à la rupture.** — Fairbairn (2) et Styffe (3), avaient remarqué que l'allongement à la rupture du fer est moindre à 150° qu'à la température ordinaire. Howard signale également cette diminution, mais il ne précise pas la position du minimum.

Les expériences de Rudeloff (4) sur le fer soudé indiquent que l'allongement diminue de 30 à 13,5 o/o entre 20 et 130°, et qu'il augmente rapidement ensuite.

Des résultats analogues ont été obtenus par Von Bach (5) et Rudeloff (4), avec des échantillons d'acier au carbone, mais les minima d'allongement sont alors atteints vers 200°.

Ainsi, *le maximum de résistance est précédé (de 50 à 80°) dans l'échelle des températures d'un minimum d'allongement* (6).

M. A. Le Châtelier (7) a montré que la vitesse de charge influe également sur l'allongement à la rupture.

Au-dessous de 300°, cet allongement augmente avec la rapidité de l'essai. Ainsi un fil d'acier extra-doux (résistance : 36 kilogrammes à 15°) a donné, à 170° :

A la traction lente..	R = 45 k ^{gr}	A = 10 o/o
A la rupture en 2".. <td>R = 27 k^{gr}</td> <td>A = 28 o/o</td>	R = 27 k ^{gr}	A = 28 o/o

Au-dessus de 300°, les allongements sont au contraire d'autant plus considérables que la charge est appliquée plus lentement.

(1) Association internationale pour l'essai des matériaux de construction (juin 1909).

(2) Report of the British Association for the advancement of science (1856).

(3) Die Festigkeitseigenschaften von Eisen und Stahl Weimar (1863).

(4) Loc. cit.

(5) Zeitschrift d. Vereines deutscher Ingenieure (1903 et 1904).

(6) Cette règle a été confirmée par tous les expérimentateurs, sauf M. Leblant, pour qui ce maximum et ce minimum coïncident.

(7) Loc. cit.

COURBES DE TRACTION

(a) **Température ordinaire.** — On connaît depuis longtemps les particularités présentées par le fer et les aciers doux recuits pendant les essais de traction effectués à la température ordinaire. La déformation comprend trois phases : la première est celle des faibles allongements (déformation élastique); elle est suivie d'un allongement rapide connu sous le nom de *palier* qui se produit sous une charge presque constante ; la troisième et dernière période est celle de l'allongement visqueux.

Les résultats obtenus par les différents expérimentateurs, quant au palier et à ses relations avec les deux autres périodes, sont loin d'être concordants. Cela tient surtout au manque d'uniformité des techniques employées.

Un essai par traction peut, en effet, se faire suivant deux méthodes différentes.

Dans la première, on impose à l'échantillon une charge croissante. On mesure les allongements ou bien on les enregistre. On obtient alors la courbe :

$$\Delta l = f(\Delta P), \text{ (} l = \text{longueur ; } P = \text{charge) .}$$

C'est la méthode des laboratoires, dont l'application est aisée, quand il s'agit de faibles charges.

Dans la seconde méthode, dont les machines d'essai industrielles sont une application, c'est l'allongement qui est imposé. On mesure alors ou l'on enregistre la tension, et l'on a la courbe :

$$\Delta P = f(\Delta l) .$$

Pour que les graphiques soient susceptibles d'une interprétation rigoureuse, il est indispensable que la variable indépendante soit appliquée d'une façon continue.

Les premières expériences, ayant pour but l'étude des courbes de traction du fer, ont été effectuées par *Ewing* (1) d'après la première méthode. Les courbes données par cet auteur présentent la forme de la figure 15. Le palier y est simplement indiqué par un double point d'inflexion.

On trouve dans le mémoire d'Ewing les premières indications sur la suppression du palier, la surélévation de la limite d'élasticité et de la charge de rupture par déformation permanente. En maintenant pendant un certain

(1) *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. xxx, juin 1880.

temps, sous une charge constante de 35 kilogrammes par millimètre carré, un fil dont la charge de rupture normale est de 37 kilogrammes par millimètre carré, on constate, quand on reprend l'essai à partir de 35 kilogrammes, que la rupture a lieu vers 40 kilogrammes avec un allongement total moindre que dans l'essai ininterrompu. Cet effet de durcissement (hardening effect) augmente d'ailleurs avec la durée pendant laquelle la charge a été maintenue constante.

Dans une deuxième série d'expériences, Ewing arrêta encore l'essai à 35 kilogrammes, mais ramenait progressivement la charge de 35 kilogrammes à 0. En reprenant l'essai après un temps plus ou moins long, sous charge nulle, on obtenait une charge de rupture du même ordre que celle de l'expérience précédente, mais un allongement moindre. L'effet de durcissement est plus grand si l'on revient à la charge zéro.

Enfin, lorsque l'arrêt à 0 est nul, la courbe du second essai se trouve, à partir de la limite élastique, dans le prolongement de la première.

D'après Ewing, lorsqu'une charge est appliquée et maintenue constante, il se produit deux effets : d'une part, un allongement visqueux graduel, d'abord rapide, puis lent, c'est l'effet de viscosité (viscous effect) ; d'autre part, l'effet de durcissement qui, lui aussi, est plus grand au début.

Ces deux effets permettent, suivant l'auteur d'expliquer les particularités que l'on constate lorsqu'on fait varier la vitesse de charge.

Si l'effet de viscosité existait seul, sans effet de durcissement, une traction plus rapide donnerait une plus forte charge de rupture et un allongement moindre, car l'échantillon n'aurait pas le temps de prendre l'allongement et, par conséquent, la diminution de section propre à chaque charge. Si, au contraire, l'effet de durcissement existait seul, c'est dans les essais les plus lents que l'on aurait les plus fortes charges de rupture et les allongements les plus faibles.

D'après cela, les métaux pourraient être classés en deux groupes : ceux pour lesquels l'effet visqueux est grand relativement à l'effet de durcissement et qui, par conséquent, donneront une charge de rupture, d'autant plus grande et un allongement d'autant moindre que la charge est plus rapide : ce serait le cas du cuivre et de l'étain ; — ceux, comme le fer, pour lesquels l'effet de

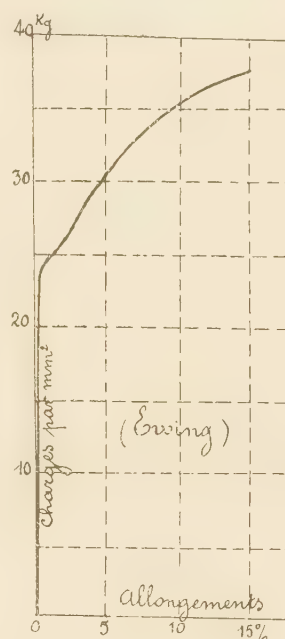


FIGURE 15.

durcissement est prépondérant et qui, par suite, doivent donner le résultat inverse.

Les recherches de M. Charpy (1) ont été effectuées à l'aide d'une machine d'essai. Les courbes obtenues sont donc représentatives de la fonction : $\Delta P = f(\Delta l)$. A l'inverse d'Ewing, l'auteur considère le palier comme un phénomène brusque. Voici, en effet, ses conclusions :

« Dans le cas où le phénomène se produit, on obtient, *non pas une sorte de point d'inflexion allongé, mais une partie véritablement rectiligne, raccordée par des angles vifs.* » (Fig. 16).

Pour les aciers au carbone, le palier se produit sous une charge d'autant plus élevée et sa longueur est d'autant plus faible que la teneur en carbone est plus élevée.

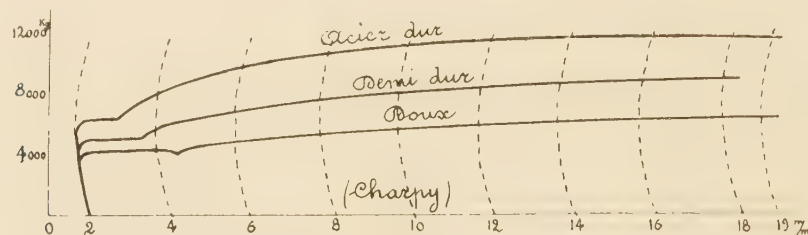


FIGURE 16.

D'après M. Charpy, ce palier brusque, que l'on ne trouve plus dans l'acier écroui ou trempé, serait l'indice d'un changement d'état. L'aspect du diagramme reste d'ailleurs le même, quand on fait varier la durée de l'essai de 1 à 10 minutes : seule, la charge correspondant au palier augmente très légèrement.

MM. Charbonnier et Galy-Aché (2) ont étudié suivant la même technique (machine d'essai) un fer ne contenant que 0,01 o/o de carbone.

Leurs graphiques (Fig. 17) diffèrent encore des précédents par une partie descendante montrant que le palier est précédé d'une chute brusque de la tension. Le début de cette chute, indiqué par un point anguleux varie d'une expérience à l'autre.

D'après les auteurs, « ce point semble correspondre à quelque propriété instable, et tout ce passe comme si la pression d'équilibre avait été dépassée. » ce phénomène de *faux équilibre* aurait son analogie dans les retards que présentent certains phénomènes physiques ou chimiques : surfusion, « sursaturation, etc. »

(1) — *Bulletin Soc. Encouragement* 1895 et 1896, ou C. R., t. 117 et t. 118.

(2) Congrès international des méthodes d'essai (1900).

Au contraire le point de début du palier est d'une « constance remarquable » ; il indiquerait nettement le passage de la période élastique à la période des déformations permanentes.

Les auteurs retrouvent des résultats analogues à ceux d'Ewing et de M. Charpy, c'est-à-dire la diminution du palier par trempe et sa disparition par écrouissage du fer. Dans le second cas, le palier réapparaît au bout de quelques mois, ce qui n'a pas lieu avec la trempe. Ils constatent également une surélévation de la limite d'élasticité dans le cas où la charge, ayant dépassé celle du palier, est ramenée à zéro pendant plusieurs heures et reprise ensuite. Ces phénomènes ont conduit MM. Charbonnier et Galy-Aché à penser également que l'écrouissage du fer produit une transformation de la « nature intime » de ce métal. On peut aussi admettre que ces effets résultent de la rupture des cristaux, lesquels pourraient se reformer peu à peu sous charge nulle et donner une nouvelle limite élastique.

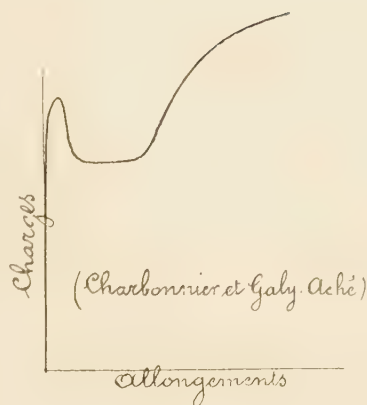


FIGURE 17.

(b) **Températures élevées.** — On doit à M. André Le Chatelier (1) les premières observations relatives aux phénomènes singuliers présentés par le fer et les aciers au carbone, quand on les essaie à la traction à des températures supérieures à la température ordinaire.

M. A. Le Chatelier distingue à ce sujet trois régions dans l'échelle des températures : 1° de 15° à 80° ; 2° de 100° à 200° ; 3° au-dessus de 240°. C'est dans la deuxième de ces régions que s'observent les faits les plus intéressants.

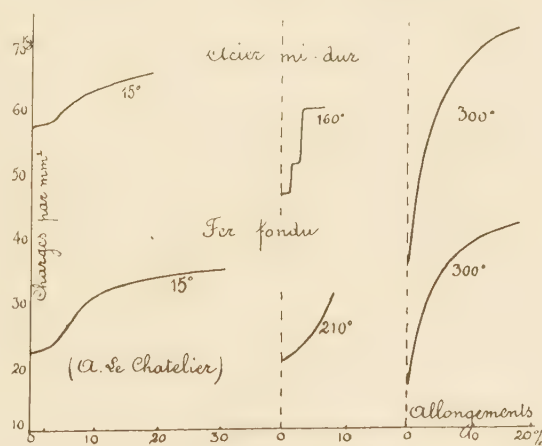


FIGURE 18.

L'auteur en donne la description suivante :

« L'allongement, au lieu d'être continu comme pour tous les métaux, se

(1) C. R. Ac. Sc., t. 109 (Année 1889).

« fait par saccades (*Fig. 18*). On observe une série d'allongements brusques, « d'amplitude assez variable, qui sont séparés par des intervalles pendant « lesquels on ne peut percevoir le plus petit allongement. Ces allongements « sont accompagnés de craquements dont la sonorité devient assez forte « vers 150°. Le plus léger choc suffit à déterminer un de ces craquements. »

« J'ai observé ces allongements par saccades dans plus de 200 expériences « et je les ai retrouvés aux mêmes températures dans tous les alliages de fer, « même dans ceux qui n'en renferment que 2 à 3 o/o. Le degré de carburation « du métal a une grande influence sur leur amplitude maxima qui dépasse « rarement 2 o/o pour le fer fondu et, pour l'acier mi-dur, peut atteindre 6 o/o, « soit 9^m/m pour un fil de 0^m 15. J'ai vérifié, sur ce dernier acier, que ces allon- « gement brusques ne sont pas localisés, mais se produisent simultanément « sur toute la longueur du fil en expérience. »

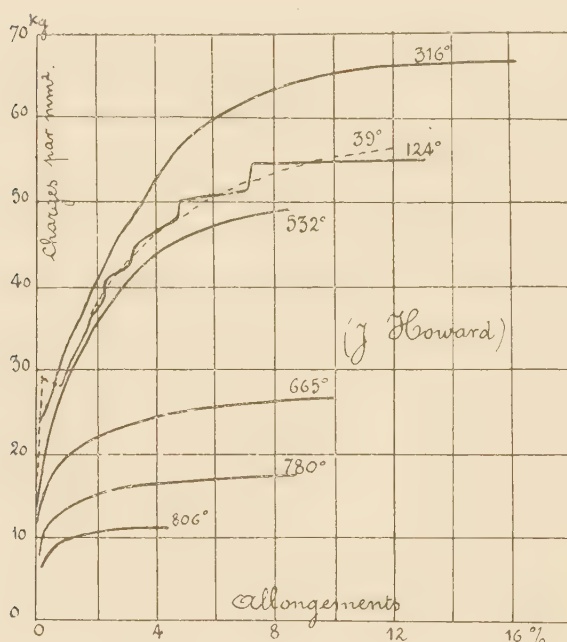


FIGURE 19.

Des observations analogues ont été faites par James Howard (1) qui a réuni sur un même graphique (*Fig. 19*) les courbes de traction obtenues à différentes températures avec un acier contenant 0,31 o/o de carbone et 0,57 o/o de manganèse.

M. Charpy (2) s'est préoccupé également d'étudier l'évolution de ces courbes sur un échantillon à 0,11 o/o de carbone et 0,70 o/o de manganèse. L'auteur ne signale pas de saccades ; il indique simplement que le palier diminue (*Fig. 20*)

en même temps que la charge sous laquelle il se produit, lorsque la température s'élève : à 400°, le palier n'existe plus. Dans une autre série de recherches (3), le même expérimentateur a pu observer, avec un acier contenant

(1) Loc. cit.

(2) Loc. cit.

(3) *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1899.

0,09 o/o de carbone et 1 o/o de nickel, « une série de « variations brusques de la « pression (1) qui semblent « correspondre à des ruptures partielles internes ». Le graphique obtenu est en tous points analogue à ceux qui ont été publiés par M. Le Blant dans le mémoire déjà cité (*Fig. 21*).

Les essais dus à ce dernier expérimentateur ont été effectués sur les trois échantillons suivants :

	C o/o	Mn o/o
Acier I.....	0,06	0,36
Acier D.....	0,29	0,78
Acier G.....	0,40	1,3

De ces essais, il résulte que les saccades sont d'autant plus nettes que l'acier est plus doux.

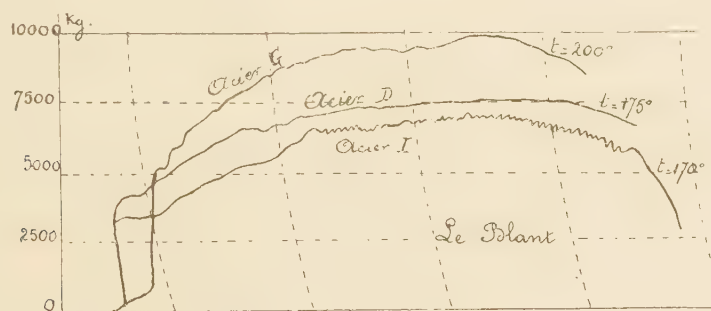


FIGURE 21.

Les limites de température entre lesquelles elles sont observables dépendent de la composition de l'acier.

Ces limites sont : pour l'acier I, de 100° à 300° ; pour l'acier D, de 125° à 250° ; pour l'acier G, de 150° à 275°.

(1) Les expériences étaient effectuées à l'aide d'une machine d'essai.

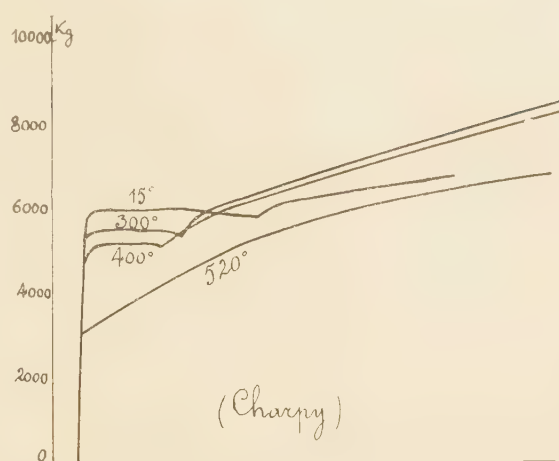


FIGURE 20.

CHAPITRE V

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Méthode. — Dans les expériences qui font l'objet de ce travail, j'ai exclusivement employé la méthode qui consiste à appliquer la charge et à mesurer les allongements, de façon à obtenir la courbe :

$$\Delta l = f(\Delta P)$$

Échantillons. — Les essais ont été effectués sur des échantillons de 0,3 millimètre de diamètre et d'une longueur de 15 centimètres.

L'emploi de fils fins présente plusieurs avantages. D'une part, on peut avoir, sous une faible masse, une grande longueur de fil, ce qui permet d'effectuer de nombreuses expériences sur des échantillons presque rigoureusement identiques, quant à la composition chimique.

D'autre part, comme la rupture se produit sous de faibles charges, on peut simplifier la disposition de l'appareil. Dans ces conditions, en effet, si l'on fixe une des extrémités du fil à un support solidement établi, les déplacements de cette extrémité sont infiniment petits par rapport à l'allongement de l'échantillon. Il suffit alors de mesurer ou d'enregistrer les déplacements de l'extrémité libre.

Application de la charge. — Un seau léger (*Fig. 23*), équilibré par deux contre-poids P et P' , est suspendu à l'extrémité libre du fil ; il reçoit un courant d'eau provenant d'un réservoir à niveau constant. La charge croît ainsi d'une façon continue et proportionnellement au temps. L'emploi d'ajutages différents permet d'en faire varier la vitesse.

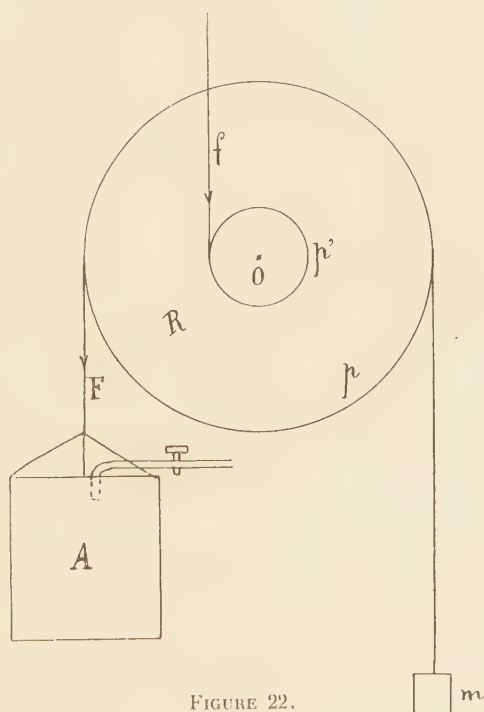


FIGURE 22.

Mais lorsqu'on veut obtenir la rupture en un temps très court (de l'ordre de 1 à 10 secondes), ce procédé n'est pas applicable. J'utilisais alors le dispositif suivant :

Sur un même axe O (*Fig. 22*) à roulement très doux sont calées deux poulies p et p' de diamètres différents. En un point de la gorge de la grande poulie est attaché un fil F qui supporte le récipient A, lequel se trouve équilibré à vide par un poids m . Sur la petite poulie est attachée une cordelette fine et solide f qui transmet la traction au fil en expérience.

Soient R et r les rayons des deux poulies. Si π est l'effort exercé en F, la traction π_1 sur le fil à essayer est :

$$(1) \quad \pi_1 = \pi \times \frac{R}{r}$$

$$(2) \quad \Delta\pi_1 = \Delta\pi \times \frac{R}{r}$$

Il suffit donc que l'écoulement du liquide dans le vase A soit constant pour que la tension sur le fil croisse d'une façon continue et proportionnellement au temps. On peut d'ailleurs faire varier $\Delta\pi$ entre de larges limites (Emploi d'ajutages différents, charge à l'aide de mercure). Lorsque la rupture se produit très rapidement, il n'est pas possible d'arrêter l'écoulement à l'instant même de cette rupture et par suite de connaître exactement π c'est-à-dire π_1 .

Pour connaître la valeur de cette charge, j'avais intercalé, entre la cordelette f et le fil à essayer, un dynamomètre muni d'un curseur à maxima (1).

Enregistrement. — Dans la plupart des expériences, les allongements étaient amplifiés au moyen d'un levier léger dont un point était solidaire de l'extrémité libre de l'échantillon. Une plume chargée d'encre est placée à l'extrémité du levier et trace la courbe sur une feuille de papier que porte un cylindre enregistreur.

Les ordonnées de cette courbe sont proportionnelles aux allongements; les abscisses sont proportionnelles aux charges. Suivant la rapidité de l'essai, le cylindre était entraîné soit par un mouvement d'horlogerie, soit par un petit moteur électrique.

J'ai aussi utilisé quelquefois une lentille convergente L (*Fig. 23*), dont la monture suspendue à l'extrémité du fil en expérience était guidée par deux tiges g et g' .

(1) A un peson, on adapte un curseur à ressort analogue à celui des règles à calcul. L'index de l'appareil déplace ce curseur sur lequel est tracé un trait de repère. Les charges sont lues sur une graduation établie à l'avance.

Une source lumineuse (fente horizontale) donne une image dont les déplacements sont proportionnels aux allongements. Dans ce cas, la courbe était enregistrée photographiquement.

Appareil de chauffe. — Le four électrique à résistance est celui qui convient le mieux pour ces expériences.

Celui que j'ai construit était disposé de la façon suivante :

Un premier tube en porcelaine *t* (Fig. 23) d'une longueur de 50 centimètres et de 30 millimètres de diamètre, était entouré d'une bande de platine (Épaisseur $= \frac{1}{10}$ m/m enroulée en hélice double avec retour à la partie supérieure. Cette bande de platine était reliée à deux prises de courant B et B' qui se trouvaient à la partie inférieure de l'appareil. Pour assurer l'uniformité de température sur toute la longueur de l'échantillon, j'avais placé à l'intérieur de ce tube de chauffe et sur les trois quarts environ de sa longueur une enveloppe cylindrique en cuivre rouge de 2 millimètres d'épaisseur.

Cet ensemble était placé dans l'axe d'un second tube en porcelaine T de 40 millimètres de diamètre intérieur et d'une longueur de 60 centimètres. L'intervalle compris entre les deux tubes était bourré d'amiante. Deux piles de rondelles d'amiante disposées aux extrémités du tube de chauffe, assuraient l'isolement thermique en ces points. Enfin,

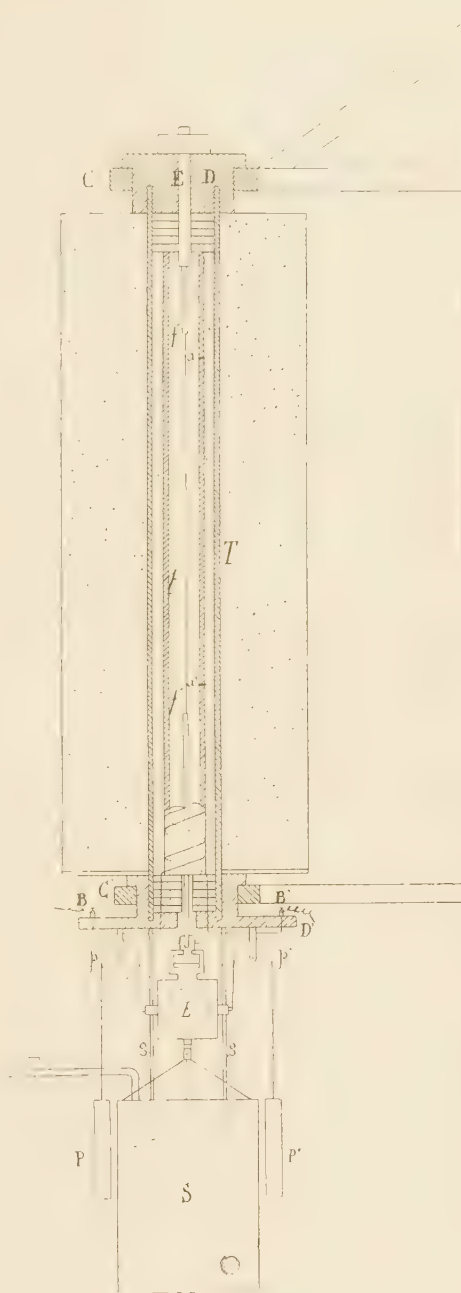


FIGURE 23.

le tube extérieur était lui-même protégé contre le refroidissement extérieur par une couche d'amiante de plusieurs centimètres d'épaisseur.

Pour éviter les courants de convection intérieurs, l'ensemble était hermétiquement fermé à la partie supérieure par une douille D. Une douille inférieure D' portait les parties accessoires (Guides, — petites poulies, . . . etc.)

Le four était fixé au mur du laboratoire par deux supports en fer forgé munis de colliers C et C' embrassant les douilles D et D'.

Suspension des fils. — Les extrémités du fil à étudier étaient fixées à deux tiges en fer (diamètre 4 ^m/m) par l'intermédiaire de pinces horlogères qui assuraient un serrage parfait.

La tige supérieure était fixée dans l'axe d'un cylindre de fer E terminé par un disque. Ce cylindre était ajusté à frottement dur dans l'axe de la douille.

La tige inférieure supportait le seau de charge, soit directement, soit indirectement, par l'intermédiaire de la monture de la lentille.

Dans toutes les expériences, la longueur initiale de l'échantillon était de 150 millimètres, c'est-à-dire moins de la moitié de celle du tube de chauffe. La température était ainsi presque rigoureusement uniforme d'un bout à l'autre du fil.

Mesure des températures. — Les températures étaient mesurées, soient avant l'essai avec un thermomètre à mercure que l'on plaçait dans la partie centrale du four, soit pendant l'essai à l'aide de deux couples Le Châtelier dont les soudures traversaient la paroi du tube de chauffe en deux points *a* et *a'* situés près des extrémités de l'échantillon. Les fils de ces couples (1) étaient logés dans l'espace compris entre les tubes *t* et *T* ; ils sortaient du tube à la partie inférieure.

En raison de sa masse relativement grande, le four n'atteignait que lentement sa température de régime (1). On le mettait en circuit aux premières heures de la journée pour effectuer les expériences dans l'après-midi. L'essai n'était d'ailleurs fait qu'une demi-heure après l'introduction de l'échantillon dans le four.

(1) Non représentés sur la figure.

(2) Il est à peine besoin de faire remarquer qu'un tel four est indispensable, si l'on veut avoir des températures parfaitement constantes pendant la durée d'un essai. L'appareil joue le rôle d'un volant thermique, lors des légères variations de courant qui peuvent se produire.

CHAPITRE VI

RÉSULTATS

Température ordinaire. — J'ai indiqué précédemment les différences que présentent les résultats fournis par divers expérimentateurs au sujet de la forme du palier.

Ces divergences doivent provenir non seulement de ce que les techniques employées n'étaient pas les mêmes, mais aussi de ce que les essais ont été faits à des vitesses non comparables sur des échantillons dissemblables quant à l'état de recuit.

Or, l'interprétation des phénomènes observés entre 100° et 300° exige que la forme des courbes obtenues à la température ordinaire soit définie sans ambiguïté.

C'est dans ce but que j'ai étudié les quatre échantillons suivants :

	C	Si	Mn
Échantillon I.....	0,07 o/o	0,04 o/o	0,22 o/o
Échantillon II.....	0,37 o/o	0,126	0,47
Échantillon III.....	0,65	0,23	0,39
Échantillon IV.....	1,05	»	0,25

Des essais préliminaires, dont il est question plus loin, m'ont amené à considérer que l'état de recuit le plus convenable est celui que l'on obtient en portant le métal à une température un peu supérieure à celle du premier point de transformation, le refroidissement subséquent étant aussi lent que possible.

Les courbes réunies dans la figure 24 ont été obtenues à la traction lente. (Durée de l'essai $\geq$ 20 minutes).

On remarque d'abord que *le palier ne débute jamais brusquement*. A partir d'une certaine charge, la courbe, d'abord rectiligne, s'infléchit progressivement et tend à devenir parallèle à l'axe des abscisses. Puis elle s'arrête brusquement en un point A très nettement marqué, sauf pour l'acier à 1,05 o/o de carbone dont la courbe ne présente dans cette région qu'une légère inflexion.

A partir de ce point A, la courbe reprend une nouvelle direction et reste continue jusqu'à la rupture.

La position du point A dans le plan des coordonnées est caractéristique, toutes choses égales d'ailleurs, de la dureté de l'acier. Si l'on désigne par Y_a

l'ordonnée de ce point, et par Y_m celle de l'extrémité de la courbe, on trouve, pour les trois premiers échantillons, les résultats suivants :

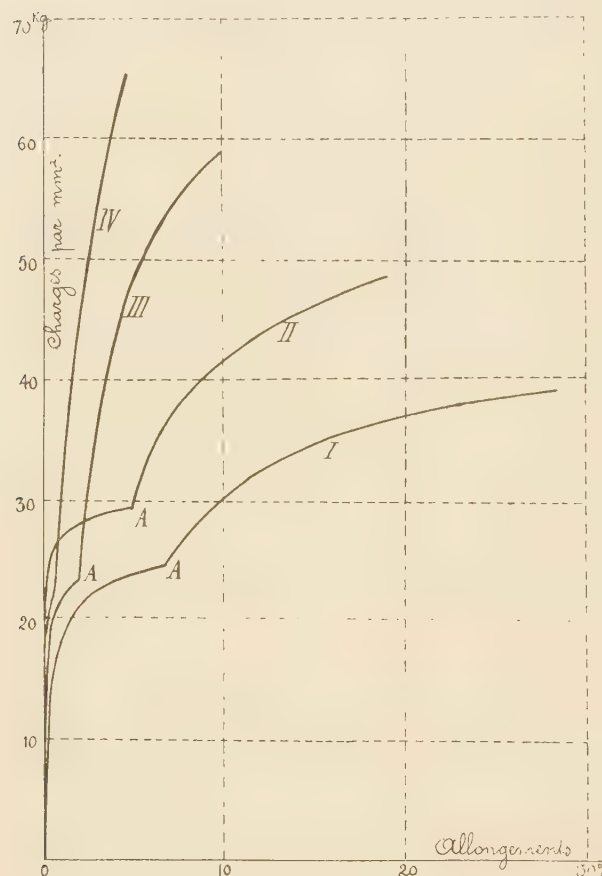


FIGURE 24.

Échantillons	Valeur du rapport $\frac{Y_a}{Y_m}$
I	0,64
II	0,60
III.....	0,39

Autrement dit, la charge qui correspond à ce point A est d'autant plus rapprochée de la charge de rupture que l'acier est plus doux.

Pour un échantillon donné, la forme de la courbe se modifie quand on fait varier la durée de l'essai. C'est ce que montre la figure 25 qui comprend les courbes fournies par les échantillons I et III avec trois vitesses de charges différentes.

L'évolution de la courbe peut encore s'indiquer par la variation du rapport $\frac{Y_a}{Y_m}$. On a ainsi ;

Courbes	Durée de l'essai	Valeurs de $\frac{Y_a}{Y_m}$	Charges de rupture par millimètres carrés
I ₁	20 minutes	0,64	38 kg. 5
I ₂	5 minutes	0,77	39 kg.
I ₃	1 minute	0,92	39 kg. 4
III ₁	34 minutes	0,39	58 kg. 5
III ₂	9 minutes	0,49	60 kg. 4
III ₃	2 secondes	0,88	62 kg. 2

La charge correspondant au point A est donc d'autant plus voisine de la charge de rupture que l'essai est plus rapide.

Avec l'acier à 0,07 o/o de carbone, on peut considérer que le point anguleux a complètement disparu quand la durée de l'essai est inférieure à une minute. Si la dureté de l'acier augmente, il faut augmenter la vitesse de charge pour obtenir le même résultat.

Il ne semble pas que l'allongement total soit notablement modifié, quand on fait varier la durée de l'essai.

Quant à la charge de rupture, elle s'élève quand la vitesse de charge augmente.

Températures élevées. — Les expériences ont porté sur l'échantillon I ($C = 0,07$ o/o), et sur l'échantillon III ($C = 0,65$ o/o). Elles ont été effectuées

aux températures suivantes : 90° , 160° , 210° , 300° , 410° . Plusieurs essais de différentes durées ont été faits à chaque température.

$t = 90^\circ$. Dès la température de 90° , l'aspect des courbes de traction se trouve notablement modifié (Fig. 26 et 27). Si la charge est appliquée lentement, l'allongement se fait d'une façon discontinue, par saccades. Entre deux saccades, la longueur du fil varie extrêmement peu. L'amplitude de ces saccades diminue quand la dureté de l'acier augmente, mais elles deviennent alors plus nombreuses. On remarquera que le phénomène commence à se produire sous une charge qui correspond à peu de chose près à celle du « palier » obtenu à la température ordinaire.

Si l'on augmente la vitesse de charge, on peut arriver à faire disparaître ces allongements brusques. Ainsi, dans l'acier à 0,07 o/o de carbone pour une durée d'essai de 3 minutes, les deux saccades principales sont remplacées

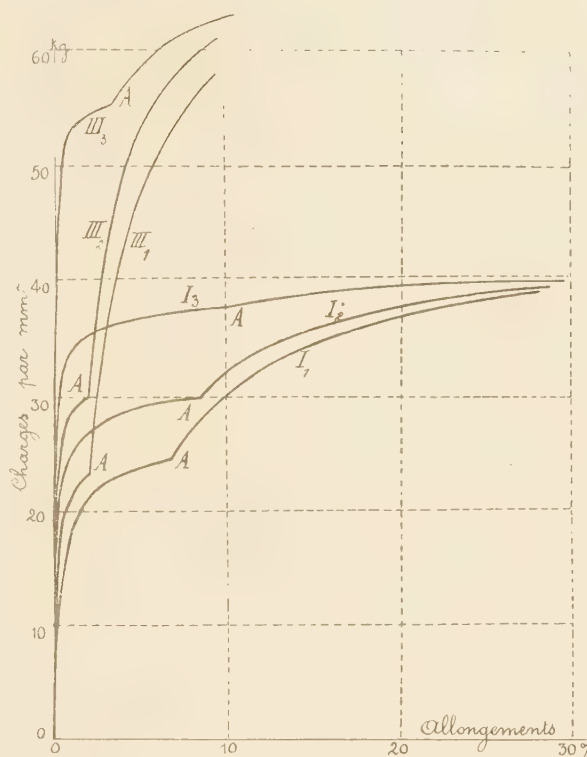


FIGURE 25

par deux parties courbes analogues au palier obtenu à 15°. Lorsque l'essai ne dure qu'une minute, on retrouve la courbe de la température ordinaire.



FIGURE 26.

Avec l'acier à 0,65 o/o de C, les saccades n'existent déjà plus dans l'essai de 20 minutes où elles sont remplacées par trois petits paliers progressifs. A l'essai de 6 secondes, on retrouve la courbe de la température ordinaire qui se transforme ensuite (essai de 2 secondes) comme elle le fait à la température ordinaire.

$t = 160^\circ$ (Fig. 28 et 29).
A cette température, on peut dire que l'allongement par

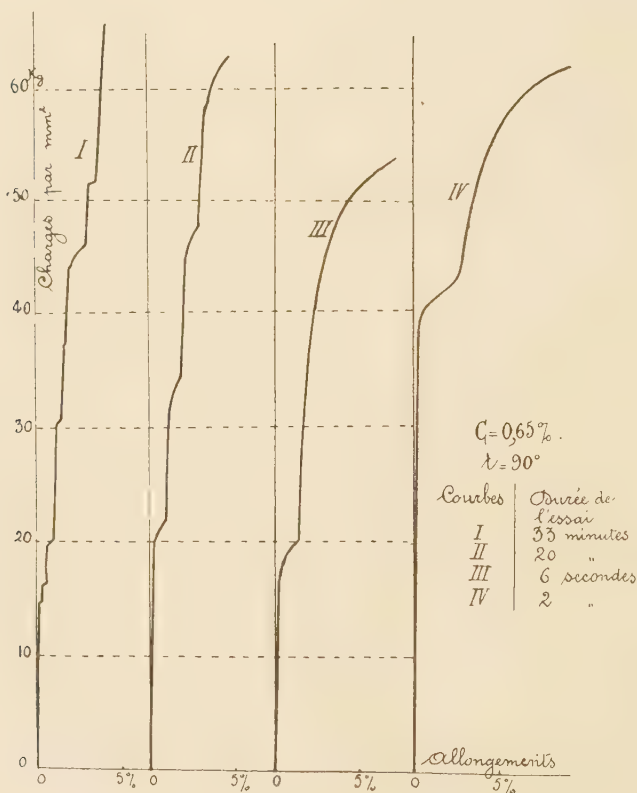


FIGURE 27.

saccades est le phénomène normal. Celui-ci est alors d'une netteté remarquable. L'amplitude de chacun de ces allongements brusques augmente, mais le nombre diminue. Ils se trouvent réduits à deux (ou même un seul) dans l'échantillon I, et à trois (ou trois groupes) dans l'échantillon III (1).

Il faut alors augmenter notablement la vitesse de charge pour faire disparaître ces discontinuités.

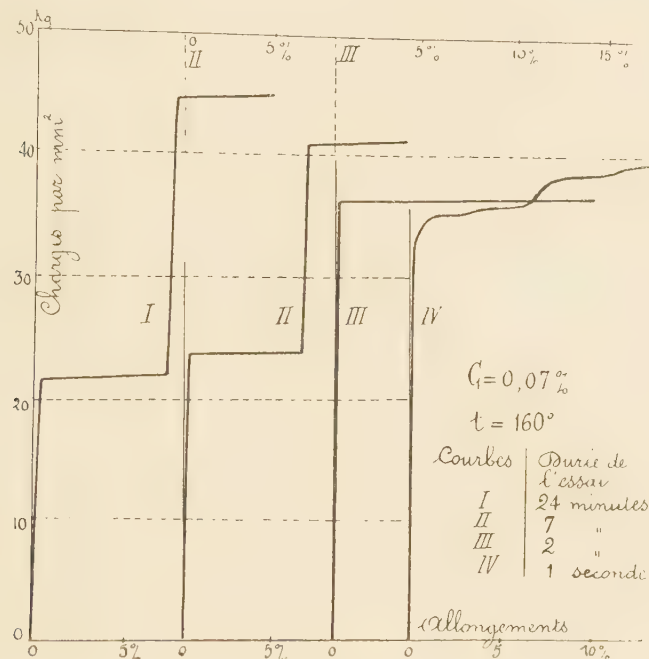


FIGURE 28.

$t = 210^\circ$. L'échantillon I donne, à 210° , des courbes identiques à celles que l'on obtient à 160° . Mais avec l'échantillon III, de nouvelles modifications se produisent. Si l'on charge très lentement, on peut arriver à obtenir une courbe où les saccades ont presque entièrement disparu (Fig. 30, courbe I). Pour les faire réapparaître et obtenir une courbe uniquement composée de parties rectilignes, il faut réduire à 3 minutes la durée de l'essai (Fig. 30, courbe III). A partir de cette vitesse, on retrouve les résultats obtenus à 160° .

$t = 300^\circ$ (Fig. 31 et 32). Un essai de 30 minutes est insuffisant pour faire

(1) Lorsqu'on opère sur un fil qui n'a pas été convenablement recuit et qui par conséquent conserve un peu d'écrouissage ou de trempe, le nombre des saccades est beaucoup plus grand, mais leur amplitude est très petite.

disparaître toute trace de discontinuité dans la courbe fournie par l'échantillon le moins carburé. Au contraire, avec l'acier à 0,65 o/o de carbone, on peut réduire la durée de l'essai à 11 minutes et la courbe reste continue. On retrouve d'ailleurs des saccades parfaitement nettes pour des vitesses de charge plus grandes. Toutefois, les parties des courbes comprises entre deux

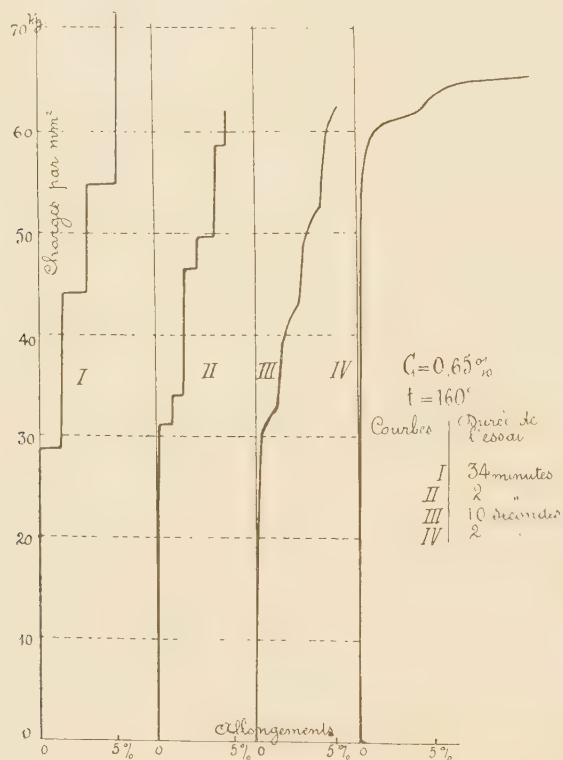


FIGURE 29.

allongements brusques ne sont pas rigoureusement rectilignes ; elles s'incurvent légèrement avant la saccade.

$t = 410^\circ$ (Fig. 33). Les courbes obtenues par traction lente sont continues et analogues à celle que donne, à la température ordinaire, le cuivre recuit. En chargeant très rapidement, on modifie la forme de la courbe en ce sens qu'on fait apparaître une région (début de la charge) où l'allongement est presque nul.

Avec les vitesses de charge dont je disposais, il n'a pas été possible de retrouver les saccades à 410° , mais l'allongement a pu être considérablement réduit.

Interprétation. — Les courbes ainsi obtenues permettent de caractériser l'état mécanique d'un échantillon d'acier déformé, dans des conditions déterminées.

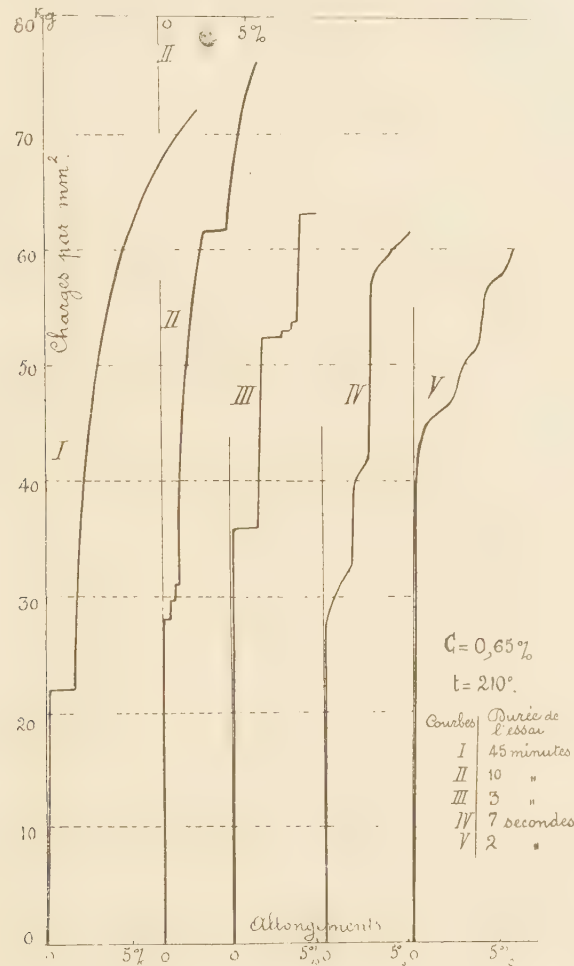


FIGURE 30.

Elles peuvent en somme se ramener à trois types : la courbe à un ou plusieurs paliers progressifs ; la courbe à saccades, la courbe continue. J'indiquerai les états mécaniques qui leur correspondent sous les noms : d'écrouissage A ; écrouissage B ; état mou.

Chacun de ces états est en réalité la résultante de l'action du milieu et de la vitesse de déformation. On peut donc le représenter dans un plan par un

point dont les coordonnées sont la température et la vitesse de charge (1) (en kilogrammes : millimètres carrés par minute). Pour plus de facilité, les

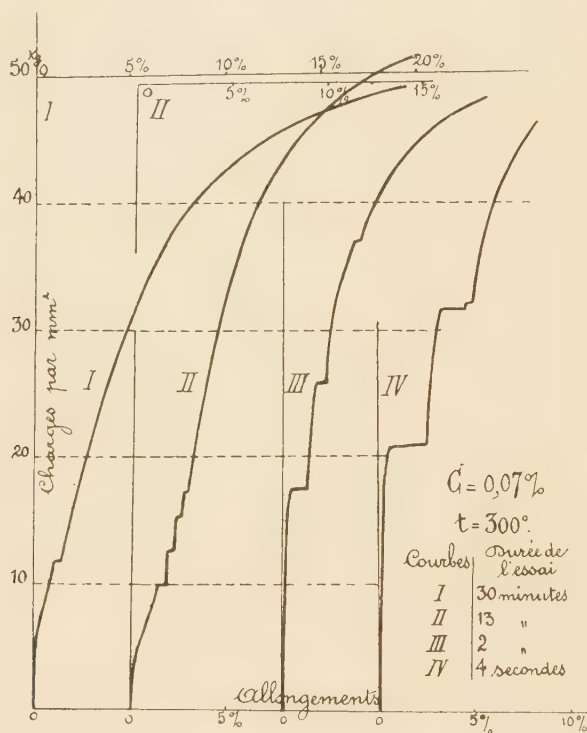


FIGURE 31.

ordonnées de la figure 34 représentent, non cette vitesse, mais son inverse, ce qui ne change rien à la signification du graphique.

Le plan des coordonnées est alors divisé en trois régions qui correspondent aux trois états indiqués ci-dessus,

Au-dessous de la température t_1 ($50^\circ - 70^\circ$), quelle que soit la vitesse de déformation, on ne peut obtenir que l'écrouissage A, c'est-à-dire une courbe à paliers progressifs.

Entre t_1 et t_2 (vers 200°), on peut réaliser, soit l'écrouissage A, soit l'écrouissage B (courbes à saccades).

(1) Il ne serait pas rationnel de considérer ici la durée de l'essai qui dépend de la valeur de la charge de rupture, laquelle est elle-même fonction des conditions de l'expérience.

Entre t_2 et t_3 (vers 300°), en faisant varier la valeur de V , on peut produire l'un ou l'autre des trois états.

Entre t_3 et t_4 , on ne peut obtenir que l'écroissage B, ou l'état mou.

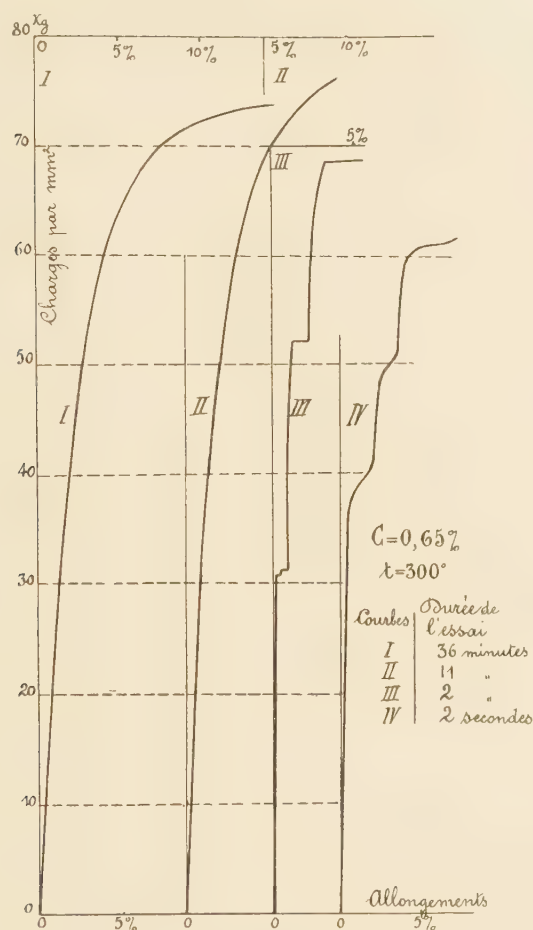


FIGURE 32.

Enfin, au-dessus de t_4 (vers 400°), on obtient toujours des courbes continues (état mou). En fait, le passage d'une région du plan à la suivante ne se fait pas brusquement, mais par une série d'états intermédiaires. La position de ces zones de transition dans l'échelle des températures varie d'ailleurs avec la composition de l'acier.

Ces résultats se précisent si l'en considère la variation de la charge de rupture avec les conditions de l'essai. Dans le tableau ci-dessous se trouvent réunis les nombres relatifs à cette variation.

I. ÉCHANTILLON A 0,07 o/o DE CARBONE

Tempé- ratures	Vitesses de charge en kg : mm ² par minute	Charges de rupture en kg : mm ²	Allonge- ments p. 100
15°	2,20	38,5	28
	7,8	39	29
	39,4	39,4	30
	960	39,8	30
90°	1	45,3	10
	2,62	42	10,2
	12,7	38,2	8,6
	35	35	17
	228	37,6	20
	1170	39	22,2
160°	1,8	44,2	13,2
	6	41,6	12
	18,2	36,4	14,4
	228	38	15
	1180	39,2	15
210°	1,55	42,4	9,5
	6,53	39,2	9,5
	12	36	10,2
	177	37,4	10
	760	38,6	11
300°	1,62	48,8	20
	4	52,4	15,8
	24	48	11,4
	698	46,5	8,6
	1260	42	8
410°	1,94	38,4	30
	7	41,3	24
	42	50	20
	960	43	7

II. ÉCHANTILLON A 0,65 o/o DE CARBONE

Tempé- ratures	Vitesses de charge en kg : mm ² par minute	Charges de rupture en kg : mm ²	Allonge- ments p. 100
15°	1,72	58,5	10
	6,7	60,4	10
	85	60	10
	1960	62,2	12
90°	2	66	4,4
	3,1	63	5
	9,06	54,4	7,5
	600	60	8,2
	1860	62,2	9,3
160°	2	71	5
	7,8	66	5,2
	31,3	62,3	4,7
	375	62,6	5,4
	1980	65,7	11,6
210°	1,6	72,7	9
	7,6	76,7	5,7
	21	62,8	5,1
	522	61	5
	1800	60	6,7
300°	2,1	73,4	15
	7	76,8	10
	34,2	68,5	6
	400	67	6,8
	1890	63,1	7,6
410°	2,2	58,5	25
	11,1	66,6	23,2
	33,9	67,8	21,6
	396	66	16
	1740	57,5	5,8

Les figures 35 et 35 *bis*, 36 et 36 *bis* sont la traduction graphique de ces résultats. Les figures 35 *bis* et 36 *bis* dans lesquelles l'échelle des abscisses est très réduite ont pour but d'indiquer le sens de la variation de la charge de rupture pour les essais très rapides.

L'examen de ces graphiques montre que l'influence de la vitesse de charge est très différente suivant la température :

1°) A la température ordinaire la variation de résistance est relativement peu importante. La charge de rupture augmente faiblement à mesure que l'essai devient plus rapide.

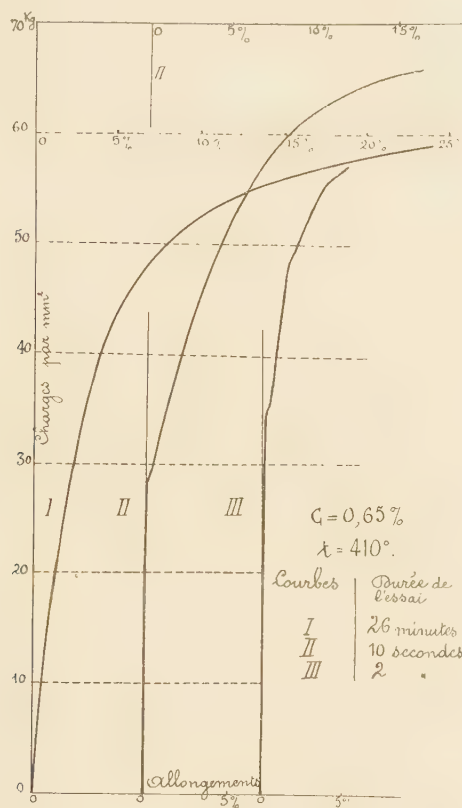


FIGURE 33.

2°) Aux températures de 90°, 160°, 210° pour l'échantillon à 0,07 o/o de carbone ; aux températures de 90° et 160° pour l'échantillon à 0,65 o/o de carbone, la charge de rupture diminue d'abord d'une façon très sensible lorsqu'on augmente la vitesse de charge à partir des essais très lents. Puis après avoir atteint un minimum, la résistance croît très lentement à mesure que la durée de l'essai est de plus en plus courte.

3°) Aux températures de 300° et 410° dans l'échantillon à 0,07 o/o de carbone ; aux températures de 210°, 300° et 410° dans l'échantillon 0,65 o/o de carbone, c'est l'inverse qui se produit.

La charge de rupture commence à augmenter avec la vitesse de charge. Elle passe par un maximum nettement marqué, diminue d'abord rapidement

puis lentement. Les faits observés peuvent alors s'interpréter de la façon suivante :

Dans les aciers au carbone, la modification mécanique (écrouissage) peut-être, suivant la température, ou bien favorisée, ou bien contrariée par l'état thermique de l'échantillon. Dans le premier cas, puisque les deux effets s'ajoutent, il est évident que l'écrouissage est d'autant plus complet que l'essai est plus lent. Autrement dit, la charge de rupture croît lorsque la vitesse de charge diminue.

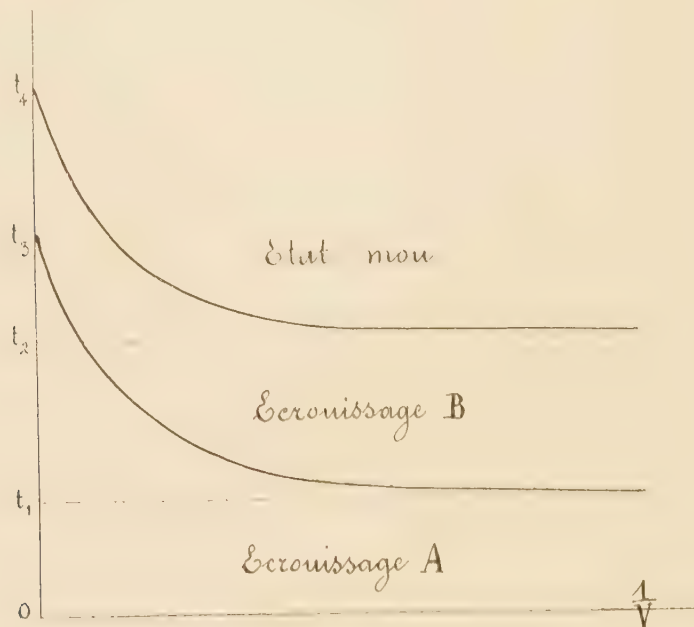


FIGURE 34.

Cette propriété, semble être particulière au fer et à ses alliages. La concordance des deux actions : thermique et mécanique, ne s'observe d'ailleurs que dans la région des températures où se produit ce que j'ai appelé l'écrouissage B, lequel est caractérisé par les courbes à saccades. Il paraît donc vraisemblable qu'à ces températures, le métal se trouve dans un état moléculaire tout particulier qu'il convient de rapprocher des formes allotropiques décelées par les méthodes physiques (1). J'ai d'ailleurs montré dans la première partie

(1) Il est intéressant de rapprocher ces résultats de ceux qui ont été obtenus par MM. Ch. E. Guye et S. Mintz dans leur « Étude sur la viscosité de quelques métaux en fonction de la température. » Archives des Sciences Physiques et Naturelles, t. 26, 1908, p. 27.

Ces auteurs ont trouvé en effet que la viscosité du fer après avoir augmenté jusque vers 100° diminue jusqu'à 200° pour croître à nouveau. C'est le seul métal qui présente cette particularité.

de ce travail (page 35) que le début de la transformation allotropique peut descendre jusque vers 100° . L'abaissement de cette limite sous l'action de la déformation ne serait qu'un cas particulier d'un fait très général.

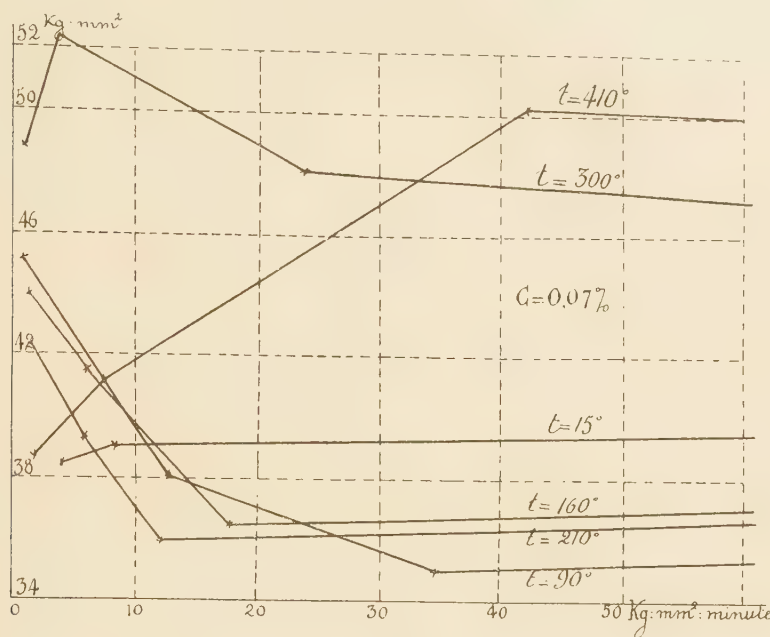


FIGURE 35.

Si au contraire la température est telle que l'écroutissage puisse être détruit au bout d'un temps plus ou moins long (phénomène du recuit) l'état du métal à un moment donné dépendra de la prépondérance de l'une ou l'autre de ces actions.

Tant que la vitesse de charge reste au-dessus d'une certaine valeur, c'est surtout l'effet d'écroutissage qui se fait sentir car le recuit ne peut, pas faute de temps, s'effectuer complètement au fur et à mesure de la déformation.

Pour les faibles vitesses, c'est l'inverse qui se produit. L'écroutissage augmente de moins en moins avec la durée de l'essai ; au contraire, l'effet de recuit est de plus en plus sensible. La charge de rupture présentera donc un maximum pour une vitesse de charge qui dépendra à la fois de la température d'essai et de la composition de l'acier.

On peut se proposer de traduire graphiquement cette interprétation.

Représentons par la courbe AB (*Fig. 37*) la variation que subirait la résistance en fonction de la vitesse de charge si l'écroutissage existait seul ; et par A'B' la diminution qui résulterait du recuit, cette diminution étant comptée à

partir de la même origine ox (charge de rupture pour une vitesse infiniment grande).

En additionnant algébriquement les ordonnées de ces deux courbes, on obtiendrait la variation réelle de la charge de rupture en fonction de la vitesse de charge (courbe en pointillé).

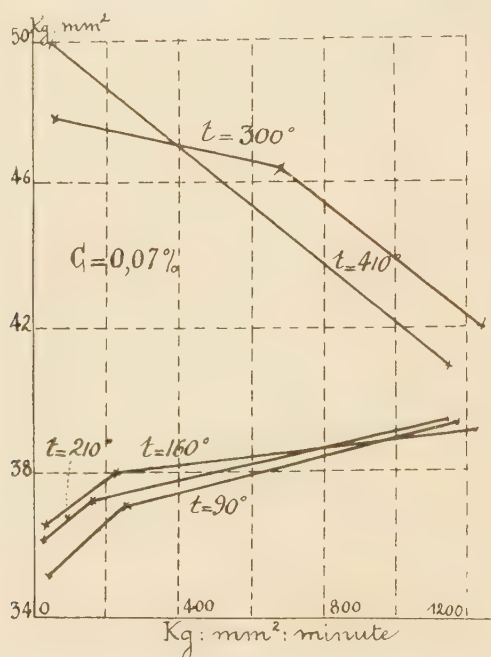


FIGURE 35 bis.

L'existence d'un maximum de cette fonction indique donc l'intervention du recuit. Il est intéressant de remarquer que l'acier à 0,65 o/o de carbone est sensible au recuit dès la température de 210°, alors que pour l'échantillon très doux à 0,07 o/o de C, la courbe à maximum n'est obtenue qu'à 300°. Nous retrouverons bientôt un résultat du même ordre dans une autre série d'expériences.

Lorsque la température est suffisamment élevée pour que le recuit soit toujours prépondérant, la charge de rupture ne peut que diminuer avec la vitesse de déformation. Autrement dit, les ordonnées négatives de A'B' sont à tout instant supérieures aux ordonnées positives correspondantes de AB.

INFLUENCE DE L'ÉCROUISSAGE PAR TRACTION SUR LA RÉSISTIVITÉ

MM. Charpy et Fraichet ont montré que l'écroutissage de l'acier modifie ses propriétés magnétiques, et ils ont été ainsi amenés à penser que la défor-

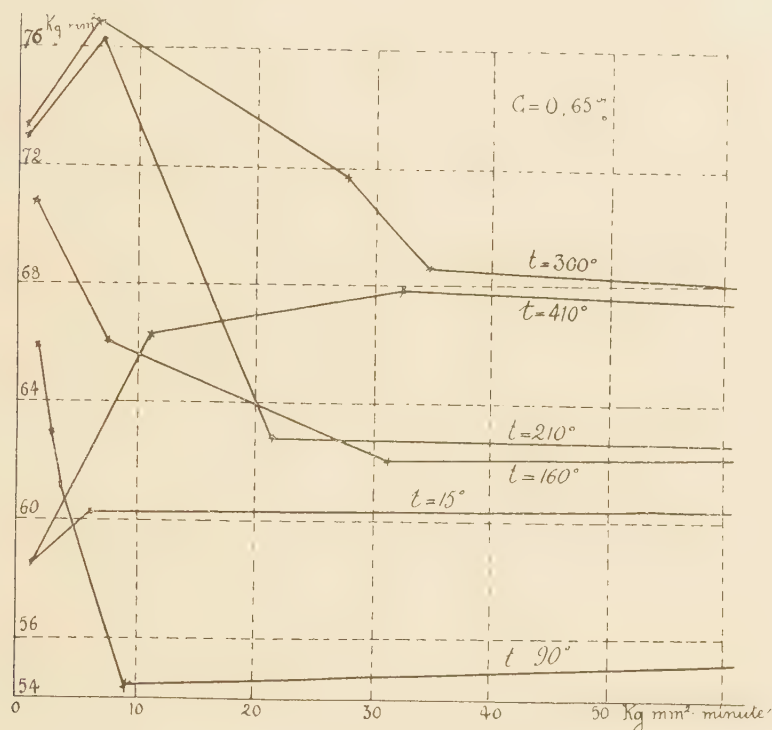


FIGURE 36.

mation produit une transformation moléculaire de même nature que la trempe.

Il était intéressant de rechercher si la traction influe également sur la résistivité.

Dans cet ordre d'idées, j'ai effectué des essais qualitatifs et des mesures absolues.

Les premiers consistent à placer le fil soumis à la traction dans l'une des branches d'un pont de Wheatstone et à établir l'équilibre électrique pour la charge zéro. Les autres résistances du pont restant constantes, toute variation de résistance du fil produira une déviation du galvanomètre. En substituant à l'échelle graduée un enregistreur photographique, on obtient une courbe qui

permettrait, comme dans les expériences de M. Fraichet, de déceler les anomalies de variation de la résistivité.

Ce procédé a été appliqué aux essais faits à différentes températures. Les courbes de résistance et d'allongement étaient enregistrées simultanément

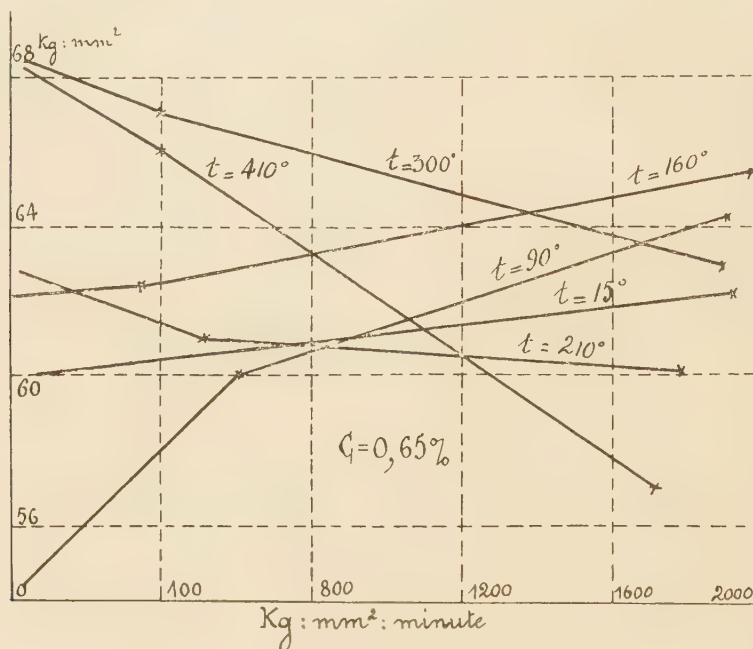


FIGURE 36 bis.

sur le même papier photographique. Dans chaque couple, les courbes présentent exactement la même forme. Les paliers et saccades des premières se produisent exactement au même instant que les paliers et saccades des secondes.

La méthode graphique ainsi appliquée ne permet donc pas de révéler les variations de résistivité. Il faut alors avoir recours à des mesures absolues. Celles-ci ont été effectuées seulement à la température ordinaire.

Soit R la résistance d'un fil de longueur l et de section s ; si ρ est la résistivité du métal, on a :

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

Lorsque, après traction, la longueur est devenue l' , la section s' et la résistivité ρ' , on a :

$$R' = \rho' \frac{l'}{s'}$$

D'où
$$\frac{\rho'}{\rho} = \frac{R'}{R} \times \frac{l'}{l} \times \frac{s}{s'}$$

Pour les faibles déformations, on peut poser :

$$ls = l's'$$

d'où
$$\frac{l'}{l} = \frac{s}{s'}$$

et par suite

$$\frac{\rho'}{\rho} = \frac{R'}{R} \frac{l'^2}{l^2}$$

Les longueurs l' et l étaient mesurées au cathétomètre ; les résistances étaient déterminées par la méthode potentiométrique indiquée dans la première partie de ce travail. Pour éliminer les variations dues aux changements de température, on avait disposé près du fil en expérience un fil témoin prélevé dans le même échantillon. On mesurait chaque fois au préalable la résistance de ce fil témoin, ce qui fournissait l'élément de correction nécessaire.

Le fil à étudier supportait à son extrémité inférieure un seau léger recevant un courant d'eau de débit constant. Pour éviter les strictions, la charge était arrêtée quand l'allongement avait atteint environ 2,5 o/o de la longueur initiale.

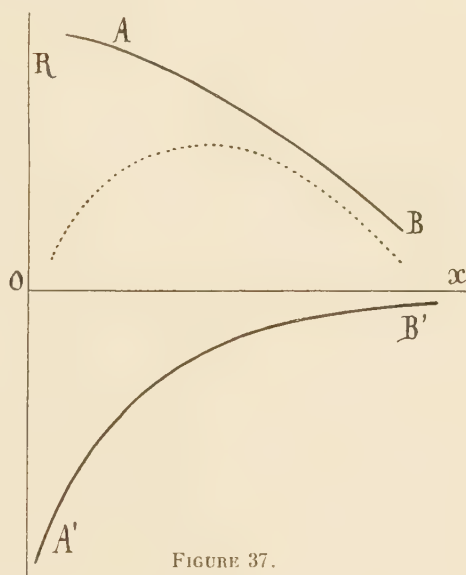


FIGURE 37.

Cinq séries de mesures ont été effectuées sur chaque échantillon :

- 1° Avant la charge : résistivité ρ .
- 2° Un quart d'heure après la fin de la charge : résistivité ρ^I .
- 3° Le fil reste soumis à la charge pendant douze heures : résistivité ρ^{II} .
- 4° La charge est diminuée progressivement jusqu'à 0 : résistivité ρ^{III} .
- 5° Douze heures après la fin de la décharge : résistivité ρ^{IV} .

Le tableau suivant résume les résultats :

Teneur en carbone de l'échantillon	$\frac{\rho^I}{\rho}$	$\frac{\rho^{II}}{\rho}$	$\frac{\rho^{III}}{\rho}$	$\frac{\rho^{IV}}{\rho}$	Allongement permanent
0,08 o/o	1,0023	0,9953	0,9952	0,9934	2,10 o/o
0,22 o/o	1,0029	1,0017	0,9992	0,9983	2,39 o/o
0,37 o/o	1,0036	1,0025	0,9998	0,9996	2,40 o/o
1,05 o/o	1,0016	1,0002	0,9950	0,9950	2,02 o/o

La déformation par traction influe donc extrêmement peu sur la résistivité. Il est intéressant de noter cependant que, dans tous les cas, cette résistivité augmente d'abord pour diminuer ensuite, même sous charge constante ; elle devient d'ailleurs inférieure à sa valeur initiale (état recuit).

RECUIT DES ÉCHANTILLONS

Les fils qui ont servi à effectuer les expériences précédentes étaient livrés bruts de filière. Il était donc nécessaire de les recuire convenablement avant de les soumettre aux essais.

Cette opération du recuit, qui est des plus simples lorsqu'il s'agit des métaux purs (1), présente quelque complexité dans le cas des aciers.

Au-dessous d'une certaine température et quelle que soit la durée du chauffage, il est impossible de détruire complètement l'écrouissage produit par le passage à la filière (2).

Si, au contraire, la température est trop élevée et le chauffage trop prolongé, on brûle le métal, ce qui se traduit par une réduction notable de l'allongement et de la charge de rupture.

C'est dans le but de déterminer la température de recuit la plus convenable que j'ai effectué quelques essais préliminaires sur les échantillons à 0,07 o/o et à 0,65 o/o de carbone.

Le chauffage direct par courant électrique dans le vide n'a donné que des mécomptes. On obtient, par ce procédé, des échantillons dont la charge de rupture et l'allongement sont réduits dans des proportions anormales, ce qui permet de supposer que le courant électrique favorise la décarburation et la cristallisation.

C'est alors le procédé suivant qui a été adopté :

Dans un tube de cuivre de 3 millimètres de diamètre intérieur et de 20 centimètres de long, on place un faisceau compact de fils à recuire. Après avoir

(1) A. Le Chatelier : Étude sur les propriétés mécaniques des métaux.

(2) Contrairement à ce qui se passe dans le revenu après trempe, le recuit après écrouissage ne se fait guère sentir qu'au-dessus de 500°.

bourré avec de la limaille de cuivre les extrémités du tube, on ferme celles-ci en les écrasant. On chauffe au four électrique à résistance. Le refroidissement est conduit à la vitesse que l'on désire par un rhéostat liquide dont on fait varier la résistance d'une façon continue. Quand on veut refroidir brusquement, on fait basculer le four et le tube est projeté dans un bac d'eau froide.

Grâce aux précautions prises, les fils ne présentaient aucune trace d'oxydation, ni de décarburation. On avait soin d'ailleurs, dans chaque opération, de peser les échantillons avant et après le recuit pour s'assurer qu'ils n'avaient subi aucune détérioration pendant le chauffage.

Les fils étaient ensuite soumis à la traction lente et les courbes de traction étaient enregistrées.

Les tableaux suivants contiennent les résultats de ces expériences. On y trouvera également des données relatives à la résistance électrique. On a désigné par R_e la résistance du fil écroui et par R_r la résistance du même fil recuit.

ÉCHANTILLON A 0,07 o/o DE CARBONE

Température du recuit	Temps du recuit	Refroidissement	Valeurs de $\frac{R_r}{R_e}$	Charge de rupture en kg. par mm ²	Allongement %
525°	2 h	lent	0,978	48,3	2
»	4 h	lent	0,970	41,3	3
»	4 h	brusque	0,988	42,2	3
»	6 h	lent	0,967	40,2	10,4
»	6 h	brusque	0,982	41,0	10
600°	30'	lent	0,975	35,0	21,5
»	30'	brusque	0,977	40,3	18,7
»	2 h	lent	0,965	36,0	23,4
»	2 h	brusque	0,983	38,5	20,3
680°	30'	lent	0,974	34,5	27
»	30'	brusque	0,988	35,8	19,5
»	1 h	lent	0,977	33,7	23
»	1 h	brusque	0,985	32,8	14,6
730°	15'	lent	0,960	33,1	26
»	15'	brusque	0,932	33,7	23,5
»	30'	lent	0,961	31,6	28
»	30'	brusque	0,975	33,2	22,2
815°	30'	lent	0,934	34,0	33
»	30'	brusque	0,958	35,6	26,4
840°	30'	lent	0,952	37,1	30
»	30'	brusque	0,993	39,3	27,2

ÉCHANTILLON A 0,65 o/o DE CARBONE

Témpera- ture du recuit	Temps du recuit	Refroidissement	Valeurs de $\frac{Rr}{Re}$	Charge de rupture en kg. par mm ²	Allongement %
525°	2 h	lent	0,953	116,5	A peine 1 %
»	4 h	lent	0,935	97,7	»
»	4 h	Brusque	0,926	104,3	»
»	6 h	lent	0,930	100,5	»
»	6 h	Brusque	0,922	99,2	»
600°	30'	lent	0,937	81,7	3
»	30'	Brusque	0,944	72,7	3
»	2 h	lent	0,922	73,7	5,8
»	2 h	Brusque	0,916	71,8	7,2
680°	30'	lent	0,911	55,6	10
»	30'	Brusque	0,898	56,2	14
»	1 h	lent	0,913	54,3	12,5
»	1 h	Brusque	0,911	55,8	15
730°	30'	lent	0,980	60,5	9,3
»	30'	Brusque	1,123	(*)	(*)
»	1 h	lent	0,940	61,5	9,6
»	1 h	Brusque	1,325	(*)	(*)

(*) Essais impossibles en raison de la fragilité des échantillons.

Considérons les résultats fournis à chaque température par le recuit maximum. A mesure que la température s'élève, la charge de rupture décroît et l'allongement augmente (*Fig. 38*). La première de ces grandeurs passe par un minimum, la seconde par un maximum, à une température qui est d'environ 700° pour l'échantillon, à 0,65 o/o de carbone et 820° pour l'échantillon à 0,07 o/o. La résistance électrique passe également par un minimum.

En même temps, la forme des courbes de traction subit une modification des plus caractéristiques. Tant que la température de recuit n'a pas atteint une certaine valeur, l'allongement est presque négligeable, et les courbes sont à peine incurvées dans leur partie terminale (Courbe I, *Fig. 39*). A partir de 600° environ, on obtient la courbe II, qui indique un allongement très rapide à la fin de la charge. L'aspect de ces courbes reste celui-ci pour des températures de recuit inférieures à 700° (échantillon dur) et à 850° (échantillon doux).

Mais aussitôt qu'on a dépassé ces températures, on obtient une courbe toute différente de la précédente (courbe IV); c'est en somme la courbe normale de l'acier.

L'examen microscopique a permis d'expliquer ces résultats. La texture des échantillons à 0,65 o/o de carbone était particulièrement nette. Le fil brut de filière présentait un type de perlite brisée, le fil recuit à 680° donnait la

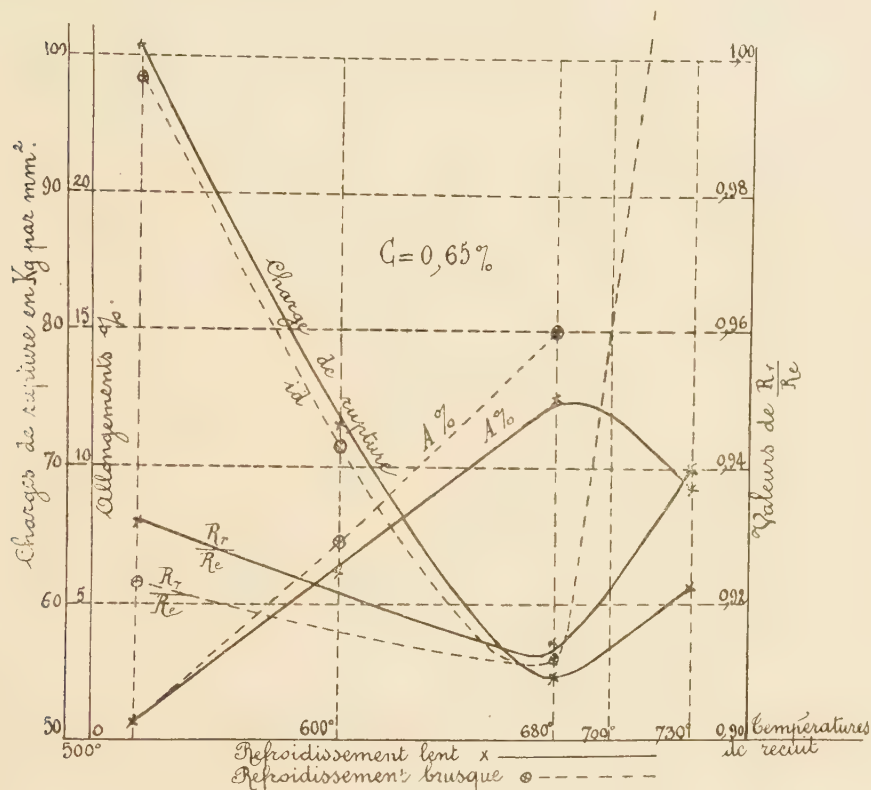


FIGURE 38.

perlite granulaire et le fil recuit à 720°, la perlite lamellaire (perlite normale).

Aussi le passage à la filière a pour effet de briser la cémentite et de la répartir dans la masse. Pour arriver à la réunir à nouveau en noyaux, il est donc nécessaire, d'après ce qui précède, de dépasser au recuit la température du premier point critique.

Ces expériences n'ont pas été poussées jusqu'à des températures plus élevées, mais elles ont suffi pour établir la règle à suivre dans le recuit des fils écrouis.

Remarques. — On remarquera que la température minimum de recuit normal est justement celle à partir de laquelle un refroidissement brusque

produit la trempe. — Cette trempe est décelée par l'augmentation considérable de la résistance électrique et l'apparition de la fragilité.

2° En ce qui concerne la résistance électrique, les résultats fournis par cette série d'expériences semblent être en contradiction avec ceux qui font l'objet du paragraphe précédent. Le recuit diminue toujours la résistivité, tandis qu'un allongement permanent de 2 à 2 1/2 o/o influe extrêmement peu. Cette particularité s'explique aisément si l'on observe que l'allongement par

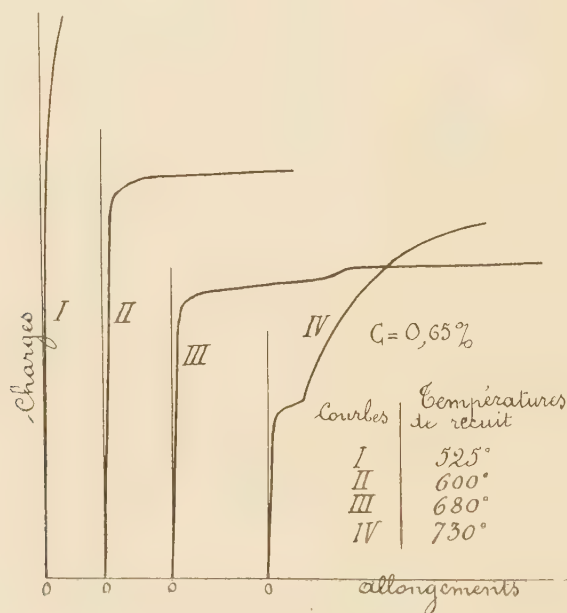


FIGURE 39.

traction et la déformation par tréfilage agissent de façon différente sur l'édifice moléculaire qui constitue le métal. Cette différence se traduit nettement dans ce fait qu'un fil présente encore un allongement notable après un premier essai jusqu'à la rupture, alors qu'au contraire un fil brut de filière ne donne qu'un allongement insignifiant. Il semble que la traction produise une orientation uniforme des groupements moléculaires, ce qui expliquerait la variation des propriétés magnétiques. Dans le passage à la filière où interviennent des pressions considérables, les assemblages cristallins sont détruits par écrasement et le métal est en somme, à l'état amorphe.

COURBES DE TRACTION DU NICKEL ET DU FERRO-NICKEL

La courbe de traction du nickel, à la température ordinaire, est celle des métaux purs (courbe I, fig. 40). Avec les échantillons parfaitement recuits, cette courbe ne présente aucune partie rectiligne. Elle conserve cette allure jusqu'à vers 120° — 130° . Mais au-dessus de ces températures, l'allongement qui, au début de la traction se fait d'une façon continue, devient irrégulier à mesure que la charge augmente. Des saccades apparaissent vers la fin de la déformation. Leur amplitude augmente en même temps que la fréquence

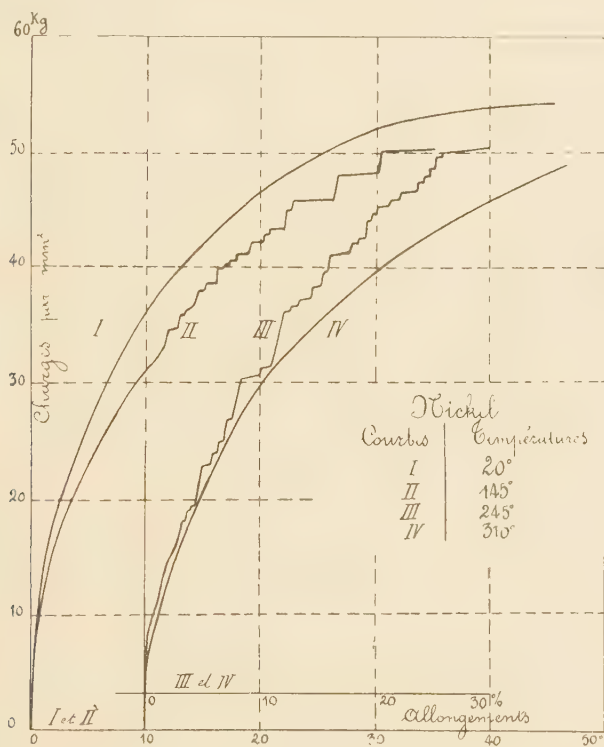


FIGURE 40.

diminue (courbe II). L'allongement à la rupture est moindre qu'à la température ordinaire, mais à l'inverse de ce qui se passe pour les aciers, la charge de rupture a diminué.

Si l'on élève la température, les irrégularités de la courbe deviennent plus nombreuses, mais elles s'atténuent (courbe III)

A 300° , la courbe est redevenue continue (courbe IV). On remarquera que cette température est celle de la disparition du ferro-magnétisme dans le nickel.

Avec l'acier à 25 o/o de nickel, on obtient des résultats analogues, mais les saccades apparaissent dès la température ordinaire (courbe I. fig. 41). Il faut chauffer jusqu'à 300° pour obtenir une courbe continue (courbe III). Il est intéressant de rappeler à ce sujet que le ferro-nickel à 25 o/o recuit n'est pas magnétique à la température ordinaire, mais qu'il le devient légèrement par

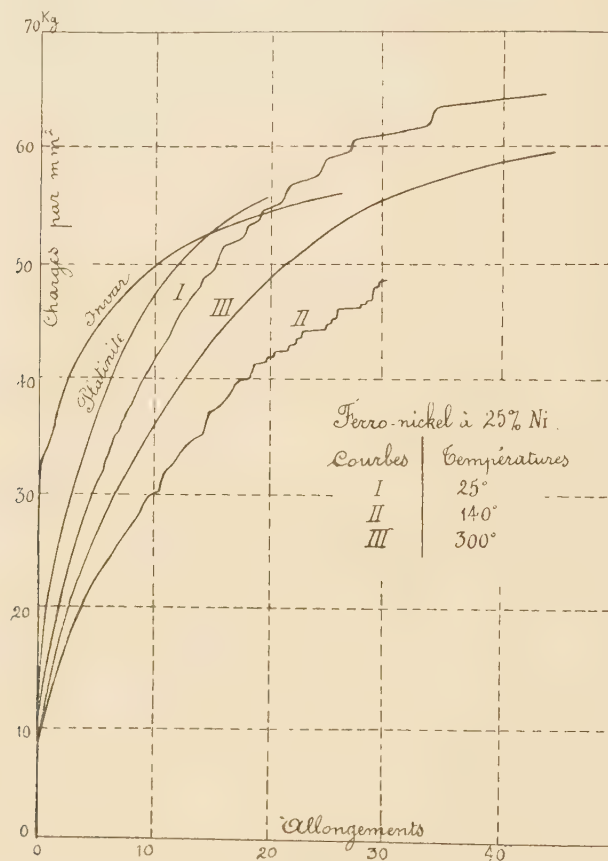


FIGURE 41.

écrouissage. Il est donc naturel de penser que l'allongement par saccades se produit au moment où la transformation commence.

Les mêmes particularités ne s'observent pas avec le ferro-nickel transformé par immersion dans l'air liquide. La courbe reste continue jusqu'à 300° avec un allongement très faible 3 à 4 o/o et une charge de rupture variant de 120 kilogrammes par millimètre (15°) à 90 kilogrammes (300°).

A titre de comparaison, on a représenté sur la figure 41 les courbes de traction de l'invar et du platinite à la température ordinaire.

CONCLUSIONS DE LA SECONDE PARTIE

Les résultats obtenus dans la seconde partie de ce travail permettent de formuler les conclusions suivantes :

1°) A la température ordinaire, la courbe de traction d'un acier au carbone présente une région connue sous le nom de *palier* et qui correspond à un allongement rapide. Avec les échantillons convenablement recuits, ce palier ne débute jamais brusquement ; il se raccorde avec la première partie de la courbe par un arc de rayon notable. La fin du palier est, au contraire, marquée par un point anguleux très net. La position de ce point dans le plan des coordonnées dépend à la fois de la composition de l'acier et de la vitesse de charge. Son ordonnée est d'autant plus voisine de l'ordonnée de rupture que l'acier est plus doux et que l'essai est plus rapide.

2°) L'aspect des courbes change quand la température s'élève. Dans les essais lents, l'allongement se fait par des saccades qui sont séparées par des régions d'allongement nul. On peut faire disparaître ces saccades en augmentant la rapidité de l'essai.

Quand la température atteint 300°, la courbe de traction lente est en grande partie continue. L'accroissement de la vitesse de charge a pour effet de faire réapparaître les saccades. A 400°, celles-ci ne se produisent plus.

3°) A une température donnée, la valeur de la charge de rupture est fonction de la vitesse de charge. Mais la loi de variation de la première de ces quantités diffère suivant la température des essais. Deux cas peuvent se présenter :

a) La charge de rupture diminue avec la vitesse de charge ; elle passe par un minimum, puis augmente très lentement.

b) La charge de rupture augmente d'abord (maximum), puis diminue rapidement et lentement.

Il existe donc une zone de température où l'apport de chaleur du milieu extérieur, au lieu de détruire l'écrouissage comme dans le cas des métaux ordinaires, le favorise et s'ajoute à l'effet de la déformation. C'est ce que j'ai appelé : écrouissage B. Cet écrouissage est caractérisé par les courbes à saccades.

4°) Ces courbes se retrouvent avec le nickel vers 100° et avec le ferromnickel dès la température ordinaire. Dans les différents cas, leur présence est donc liée à l'existence d'une transformation allotropique.

5°) Lorsqu'on recuit à des températures croissantes un fil d'acier brut de filière, on constate que la charge de rupture diminue jusqu'à un minimum qui paraît être en relation avec le premier point de transformation.

En même temps, la courbe de traction subit une évolution caractéristique. Elle ne devient « normale » que lorsque la température de recuit a dépassé celle de ce point.

6°) L'écrouissage par traction qui influe sur les propriétés magnétiques du fer et des aciers ne modifie que très peu leur résistivité.

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté :
LES COMBINAISONS DIRECTES DE L'AZOTE.

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 17 Novembre 1913

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

PAUL APPELL.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Le Vice-Recteur de l'Académie de Paris,

L. LIARD.

